

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Moderní metody svařování aplikované v ČR

**Modern Welding Methods Applied in Czech
Republic**

Student:

Pavel Šmíra

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Drahomír
Schwarz, CSc.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Šmíra**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Specializace: **70 Strojírenská technologie**
Téma: **Moderní metody svařování aplikované v ČR**
Modern Welding Methods Applied in Czech Republic

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte přehled moderních metod svařování.
2. Popište základní parametry svařování vybraných metod.
3. Zpracujte přehled společností aplikujících tyto metody svařování v ČR.
4. Popište materiály a typy výrobků u kterých se aplikují tyto metody.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě : 23.5.2011



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 23.5.2011



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Pavel Šmíra

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Čeladná 540; Čeladná, 739 12

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ŠMÍRA, P. *Moderní metody svařování aplikované v ČR : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2011, 62 s. Vedoucí práce: Schwarz, D.

Účelem této bakalářské práce je vytvořit přehled a zmonitorovat používání moderních metod svařování v oblasti strojírenské výroby v České republice. Mezi moderní metody zde řadíme laserové, plazmové, elektronové, laser-hybridní svařování a třecí svařování s promíšením. U každé metody je uveden princip tvorby svarového spoje, svařovací zařízení, parametry svařování, výhody, nevýhody a praktická aplikace metody.

Klíčová slova: Moderní metody svařování, Laserové svařování, Plazmové svařování, Elektronové svařování, Laser-hybridní svařování, Třecí svařování s promíšením

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

ŠMÍRA, P. *Modern Welding Methods Applied in Czech Republic : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2011, 62 p. Thesis head: Schwarz, D.

The purpose of this bachelor thesis is to create and to monitor usage of modern methods of welding on the field of mechanical engineering in the Czech Republic. By modern methods of welding this thesis refers to laser beam welding, plasma arc welding, electron beam welding, laser-hybrid welding and friction stir welding. There are principle of making welded joints, welding equipment, welding parameters, advantages, disadvantages and practical application listed for each method.

Keywords: Modern Welding Methods, Laser Beam Welding, Plasma Arc Welding, Electron Beam Welding, Laser-Hybrid Welding, Friction Stir Welding

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů	8
1. Úvod do problematiky moderních metod svařování	9
2. Současný stav	9
2.1 Plazmové svařování (15)	10
2.1.1 Princip technologie	11
2.1.2 Svařovací zařízení	12
2.1.3 Parametry svařování	16
2.1.4 Výhody a nevýhody plazmového svařování	17
2.1.5 Aplikace plazmového svařování	18
2.2 Elektronové svařování (51)	19
2.2.1 Princip metody	20
2.2.2 Svařovací zařízení	21
2.2.3 Parametry svařování	23
2.2.4 Výhody a nevýhody elektronového svařování	24
2.2.5 Aplikace elektronového svařování	25
2.3 Laserové svařování (52)	27
2.3.1 Princip metody	28
2.3.2 Svařovací zařízení	29
2.3.3 Parametry svařování	33
2.3.4 Výhody a nevýhody laserového svařování	34
2.3.5 Aplikace laserového svařování	34
2.4 Třecí svařování s promíšením (43)	36
2.4.1 Princip metody	36
2.4.2 Svařovací zařízení	39
2.4.3 Parametry svařování	42

2.4.4 Výhody a nevýhody třecího svařování s promíšením.....	42
2.4.5 Aplikace třecího svařování s promíšením.....	43
2.5 Laser-hybridní svařování.....	45
2.5.1 Princip metody	46
2.5.2 Svařovací zařízení	47
2.5.3 Parametry svařování	50
2.5.4 Výhody a nevýhody laser-hybridního svařování	50
2.5.5 Aplikace laser-hybridního svařování	51
3. Přehled společností aplikující moderní metody svařování v ČR	53
4. Diskuze výsledků	54
5. Závěr.....	56
Seznam použité literatury	58

Seznam použitých značek a symbolů

ČR	Česká republika
FSW	Friction stir welding = Třecí svařování s promíšením
14	Obloukové svařování wolframovou elektrodou v ochranném plynu
15	Plazmové svařování
43	Třecí svařování s promíšením
51	Elektronové svařování
52	Laserové svařování
131	Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
135	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
151	Plazmové MIG svařování
152	Plazmové svařování s přídavkem prášku

1. Úvod do problematiky moderních metod svařování

Svařování je významnou technologickou metodou spojování materiálů, která v současné době prochází dynamickými změnami. ^[1] Tyto změny se týkají také oblasti vývoje a zdokonalování nových metod svařování. Nejvýznamnější roli zde ale sehrávají ekonomické aspekty, které ve svařování příznivě ovlivňujeme snižováním množství přídavného materiálu, zvyšováním produktivity svařování, zvyšováním jakosti svarového spoje aj. Některé moderní metody pracují i bez potřeby vnášení přídavného materiálu do svarového spoje. Mezi nejvýznamnější metody svařování mající v dnešní době velký vliv na tyto ekonomické aspekty jsou svařování laserem, svařování plazmou, svařování elektronovým paprskem, svařování laser-hybridem a třecí svařování s promíšením. Navíc u těchto metod svařování vzniká, oproti běžně používaným metodám svařování, menší tepelně ovlivněná oblast a menší tepelné ovlivnění této oblasti a po svařování vznikají mnohem menší, až téměř žádné deformace a napětí ve svařované součásti. Tyto metody svařování navíc ještě umožňují svařovat, pro běžné metody svařování těžko až nesvařitelné materiály, které jsou neustále vyvíjeny a zdokonalovány pro potřeby některých průmyslových odvětví, např. jaderné techniky, leteckého a kosmického průmyslu. ^[2]

I přes značné výhody výše zmiňovaných metod svařování nejsou stále tyto metody značně rozšířeny. K nejzásadnějším důvodům malého rozšíření patří vysoké pořizovací náklady za zařízení pro svařování a jejich provoz. Z těchto důvodů je vhodné, aby společnosti, které potřebují svařit nějakou součást výše zmiňovanou metodou svařování a nemají k dispozici, popř. se jim nevyplatí pořizovat a provozovat tyto svařovací zařízení, měly k dispozici přehled firem, které tyto zařízení vlastní a dle vzájemné dohody si mohli nechat u firmy součást vyrobit.

2. Současný stav

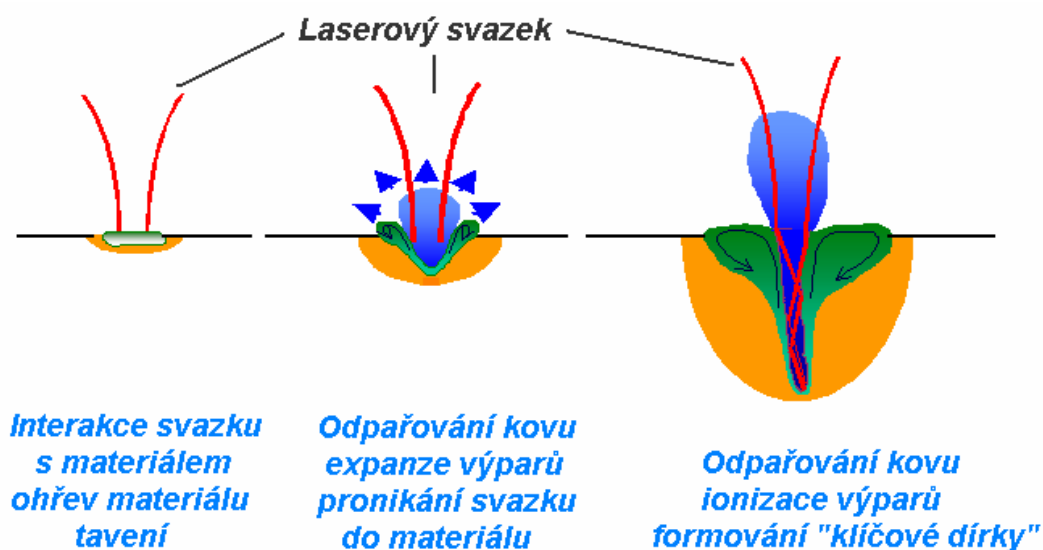
Všechny výše zmíněné metody svařování se běžně řadí do skupiny nekonvenčních metod svařování. Toto označení skupiny naznačuje, že tyto metody svařování jsou všeobecně málo používány, v porovnání s ostatními, běžně používanými metodami svařování. I přes toto označení lze říct, že skoro všechny tyto metody svařování si již našly v českém průmyslu své místo.

2.1 Plazmové svařování (15)

Tato metoda byla odvozena od metody svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranném plynu (14) v roce 1953. ^[3] Jedná se tedy o obloukové svařování v ochranné atmosféře inertního plynu, jejichž hlavní přednosti oproti metodě svařování 14 jsou hlavně vyšší produktivita, kvalita svaru a nižší deformace svařence. Svařovací proces je vysoce stabilní, což nám umožňuje aplikovat mikroplazmové svařování i svařování „klíčovou dírkou“.

Princip svařování „klíčovou dírkou“ (keyhole welding)

Klíčová díрка je otvor v přední části svarové lázně, který vzniká působením, na malou plochu koncentrovaného, zdroje tepla na základní materiál. Uzavření klíčové dířky je zabráněno tlakem plynů, které se v ní nahromadily vypařováním ze svarové lázně při působení vysoce koncentrovaného tepla. Při posuvu tohoto zdroje tepla ve směru svařování dochází vlivem povrchového napětí svarové lázně k jejímu opětovnému spojení za klíčovou dířkou. Hlavním přínosem tohoto principu je snížení, až úplná eliminace, potřeby dodávat přídatný materiál do svarové lázně, oproti běžným metodám několikanásobně větší hloubku průvaru, menší vnesené napětí a deformace svařence, vyšší kvalita svaru a navíc v místech, kde nepotřebujeme dodávat přídatný materiál nám odpadá potřeba úkosování svarových ploch. Hlavní podmínkou tohoto druhu svařování je přesné obrobení ploch svarové mezery, abychom dosáhli při svařování konstantního průřezu svarové mezery. Na tomto principu vzniku svarového spoje fungují metody elektronového a laserového svařování, u svařování plazmovým obloukem je to jedna z variant výroby svarového spoje.

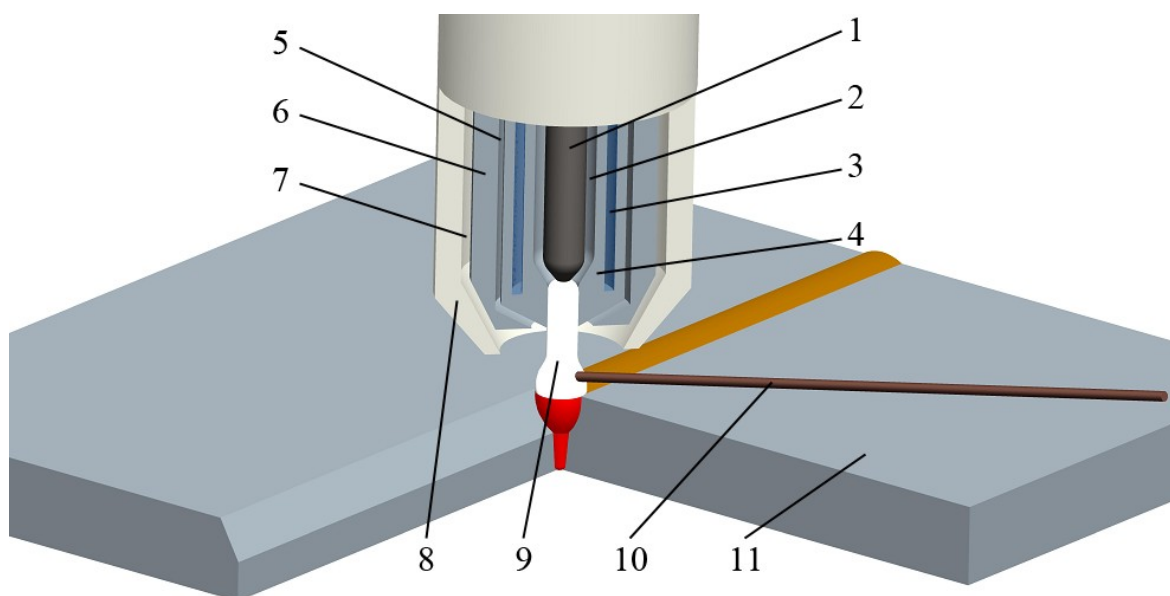


Obr. 2.1.1 Princip vzniku „klíčové dířky“ ^[4]

2.1.1 Princip technologie

Plazma je z fyzikálního hlediska speciální stav plynů, který u této metody vzniká jeho ionizací. Při svařování plazmovým obloukem ionizujeme plyn jeho průchodem přes elektrický oblouk, čímž vzniká plazmový oblouk. Hlavní výhodou plazmového oblouku, kterou při svařování používáme, je vysoce stabilní svařovací proces a vysoké teploty plazmového oblouku, pohybující se v řádu 10^4 K. [5]

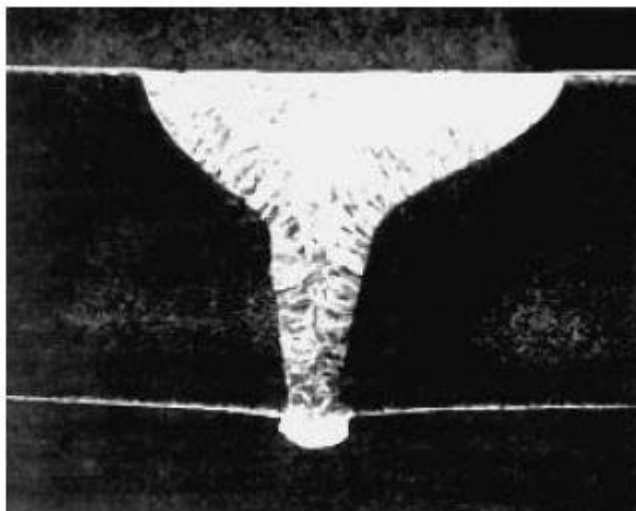
Plazmový oblouk při svařování vzniká, za přítomnosti plazmového plynu, mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním svařovaným materiálem. Běžná polarita u této metody svařování je, wolframová elektroda zapojena jako katoda a základní materiál jako anoda. Oblouk prochází dýzou velmi malého průměru, která jej tvaruje tak, aby tepelná energie tohoto oblouku byla soustředěná na poměrně malou plochu základního materiálu. Zaostřování oblouku lze ještě dále podporovat fokusačním plynem, který lze přivádět, u hořáků k tomuto konstruovaných, přímo pod otvor v dýze. Hoření plazmového oblouku probíhá v ochranné atmosféře inertního plynu, nejčastěji směsi argonu s přídavkem vodíku. Přídavný materiál je přiváděn, ručně nebo pomocí podávacího zařízení, do místa hoření plazmového oblouku, kde se nataví a je urychlen směrem ke svařovanému materiálu (Obr. 2.1.2). [2][5]



Obr. 2.1.2 Schéma svařování plazmovým obloukem s fokusačním plynem

- 1 – wolframová elektroda, 2 – přívod plazmového plynu, 3 – vodní chlazení, 4 – první dýza,
5 – přívod fokusačního plynu, 6 – druhá dýza, 7 – přívod ochranného plynu, 8 – ochranná hubice,
9 – plazmový oblouk, 10 – přídavný materiál, 11 – základní materiál

Svary provedené plazmovým svařováním mají nejčastěji podobu „pohárku“. Na tvar svarového kovu má vliv i úprava svarových ploch. U svařování do tloušťky stěny 8 mm není třeba svarové plochy úkosovat (*Obr. 2.1.3*). V případě použití přídavného materiálu ve formě prášku vzniká souvislá návarová vrstva.



Obr. 2.1.3 Svar tloušťky 13 mm provedený plazmovým svařováním ^[6]

2.1.2 Svařovací zařízení

Norma ČSN EN ISO 4063 rozděluje plazmové svařování na pět metod, podle způsobu přívodu přídavného materiálu a způsobu přenesení oblouku, což má vliv na technické řešení svařovacího zařízení, hlavně na řešení svařovacího hořáku. Nejvýhodnější je proces svařování automatizovat pomocí svařovacího robota.

Rozdělení metody 15 dle normy ČSN EN ISO 4063:

- Plazmové MIG svařování (151)
- Plazmové svařování s přídavkem prášku (152)
- Plazmové svařování s přeneseným plazmovým obloukem (153)
- Plazmové svařování s nepřeneseným plazmovým obloukem (154)
- Plazmové svařování s polopřeneseným plazmovým obloukem (155)

Svařovací zařízení je obdobné jako u metody 14, obsahuje však navíc některá nezbytná zařízení a hlavně rozdílný typ svařovacího hořáku.

Svařovací zařízení PMI - 500 firmy SBI obsahuje proudový invertor, řídicí jednotku, vysokonapěťovou jednotku, plynový regulátor a chladicí systém. Tyto prvky tvoří kompaktní jednotku, na kterou lze připojovat různé typy plazmových svařovacích hořáků. Tuto jednotku lze použít i pro jiné metody obloukového svařování. [7]



Obr. 2.1.4 Svařovací zařízení PMI – 500 [7]

Svařovací zařízení firmy Fronius je podobné konstrukce, s rozdílem, že netvoří jeden celek, jako předchozí zařízení. Skládá se z libovolného digitálního svařovacího zdroje Fronius, na který se napojí plazmový svařovací modul FPM. [8]



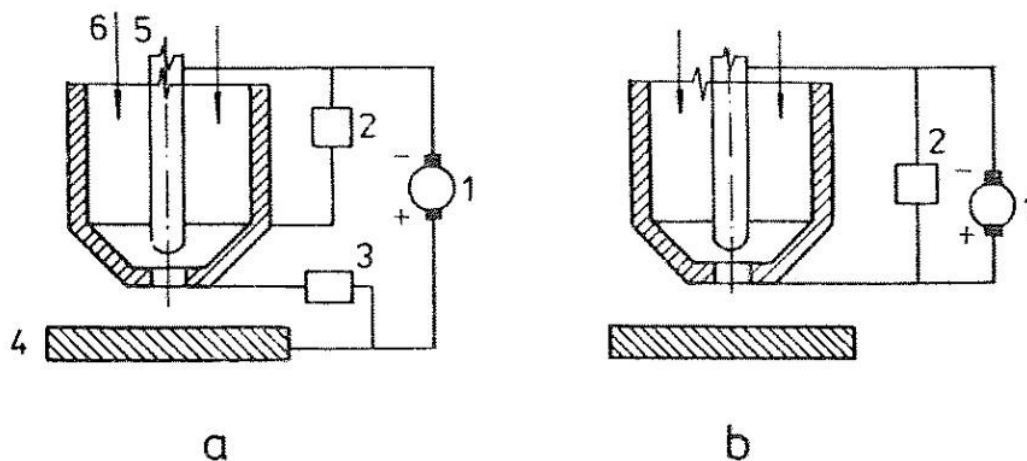
Obr. 2.1.5 Svařovací zdroj MagicWave 2600 s připojeným FPM modulem [8]

Hořáky

Svařovací hořák je jednou z nejdůležitějších částí plazmového svařovacího zařízení. V hořáku probíhá vznik, hoření a tvarování plazmového oblouku, přívod plazmového, fokusačního a ochranného plynu, popř. přívod přídavného materiálu. Svařovací hořák je z důvodu velkého ohřívání ochlazován nuceným oběhem vody.

U svařovacího hořáku s přeneseným plazmovým obloukem hoří plazmový oblouk mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Přídavný materiál se zde přivádí ručně, strojně nebo se nepřivádí vůbec. Tento plazmový oblouk se používá při svařování elektricky vodivých materiálů (*Obr. 2.1.6 a*).

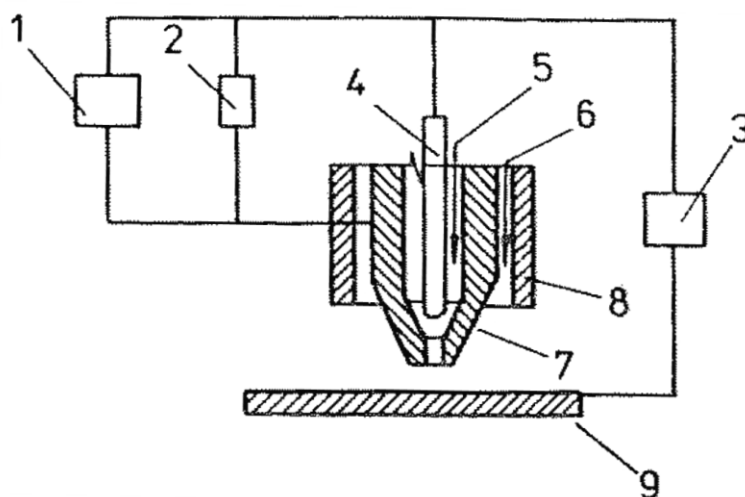
U svařovacího hořáku s nepřeneseným plazmovým obloukem hoří plazmový oblouk mezi wolframovou elektrodou a dýzou. Přívod přídavného materiálu je obdobný, jako u předchozího hořáku. Aplikace tohoto typu hořáku je při svařování elektricky nevodivých materiálů (*Obr. 2.1.6 b*).



Obr. 2.1.6 Schéma svařování plazmovým obloukem ^[5]

a – přeneseným, *b* – nepřeneseným, 1 – zdroj svařovacího proudu, 2 – vysokofrekvenční zdroj, 3 – odpor pomocného oblouku, 4 – základní materiál, 5 – wolframová elektroda, 6 – plazmový plyn

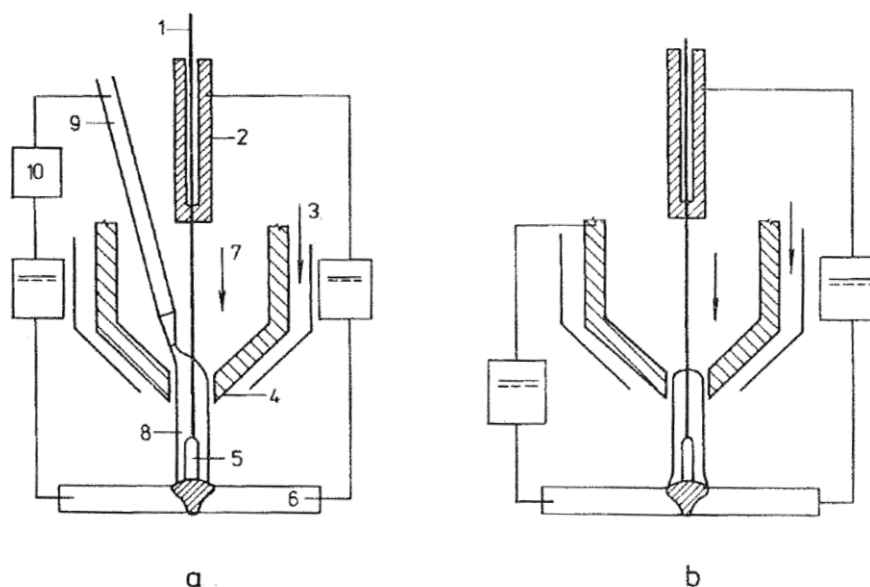
U plazmového hořáku s polopřeneseným plazmovým obloukem hoří plazmový oblouk mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem i dýzou. Přívod přídavného materiálu je obdobný, jako u předchozích variant hořáků. Tento oblouk se nejčastěji používá u mikroplazmového svařování. (*Obr. 2.1.7*).



Obr. 2.1.7 Schéma svařování polopřenesným plazmovým obloukem ^[5]

1 – zdroj nepřeneseného oblouku, 2 – ionizátor, 3 – zdroj nepřeneseného oblouku, 4 – wolframová elektroda, 5 – plazmový plyn, 6 – ochranný plyn, 7 – dýza, 8 – ochranný kryt, 9 – základní materiál

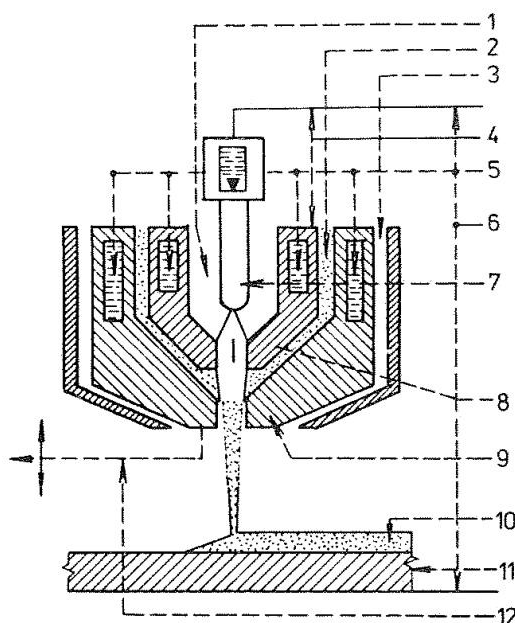
U plazma – MIG svařovacího hořáku hoří elektrický oblouk mezi tavící se elektrodou a základním materiálem. Plazmový oblouk zde může hořet mezi wolframovou elektrodou, popř. měděnou dýzou, a základním materiálem. (Obr. 2.1.8)



Obr. 2.1.8 Schéma plazma – MIG svařování ^[5]

a – plazmový oblouk hořící mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem, b – plazmový oblouk hořící mezi dýzou a základním materiálem; 1 – tavící se elektroda, 2 – kontaktní trubice, 3 – ochranný plyn, 4 – měděná dýza, 5 – elektrický oblouk, 6 – základní materiál, 7 – plazmový plyn, 8 – plazmový oblouk, 9 – wolframová elektroda, 10 – zdroj energie

Svařovací hořák pro metodu 152 se vyznačuje přívodem práškového přídavného materiálu do plazmového oblouku. Plazmový oblouk je polopřenesený, napájený dvěma nezávislými zdroji, kterými lze korigovat míru ohřání přídavného materiálu a základního materiálu. Toto zařízení se používá pro plazmové navařování (Obr. 2.1.9).



Obr. 2.1.9 Schéma plazmového navařování práškovým přídavným materiálem [5]

1 – plazmový plyn, 2 – nosný plyn s práškovým přídavným materiálem, 3 – ochranný plyn, 4 – napájení nezávislého plazmového oblouku, 5 – chladicí voda, 6 – napájení závislého plazmového oblouku, 7 – katoda, 8 – první dýza, 9 – druhá dýza, 10 – navařovaná vrstva, 11 – základní materiál, 12 – podélný a příčný kývavý pohyb

2.1.3 Parametry svařování

Svařovací parametry pro plazmové svařování předepsané normou ČSN EN ISO 15609-1:

- Druh proudu (stejnoseměrný nebo střídavý proud) a polarita
- Podrobnosti pulzního svařování (nastavení stroje, výběr programu), pokud jsou použity
- Proudový rozsah
- Rozsah pojezdové rychlosti

- Rozsah rychlosti podávání drátu/pásky
- Použitý ochranný plyn – označení a složení podle EN 439
- Rozsah tepelného příkonu, pokud je specifikován
- Parametry plazmového plynu, např. složení, průměr trysky, průtokové množství
- Průtokové množství ochranného plynu a průměr hubice
- Typ hořáku
- Vzdálenost napájecího průvlaku od pracovního kusu: vzdálenost trysky od povrchu pracovního kusu

2.1.4 Výhody a nevýhody plazmového svařování

Výhody ^[9]

- Vyšší rychlost svařování
- Vynikající kvalita svaru
- Úspora přídavného materiálu
- Menší tepelně ovlivněná oblast
- Menší deformace svařence
- Vhodný pro robotizované svařování, díky stabilitě procesu a snadné reprodukovatelnosti svaru
- Zachování příznivých mechanických hodnot základního materiálu
- Do tloušťky 8 mm není nutné svarové plochy úkosovat

Nevýhody

- Vyžaduje speciální svařovací zdroj
- Vyšší spotřeba plynu

2.1.5 Aplikace plazmového svařování

Metoda plazmového svařování v sobě zahrnuje mnoho způsobů výroby svarového spoje, které mohou být např. bez nebo s použitím přídavného materiálu. Dalším významným použitím plazmového svařování je tzv. „mikroplazmové“ svařování, které spočívá v použití nízkého svařovacího proudu $I = (0,1 \div 20) \text{ A}$.

Plazmové svařování bez přídavného materiálu se využívá zejména při spojování plechů malých a středních tloušťek. Nejpodstatnější použití je při svařování nerezavějících chromniklových ocelí a při svařování titanu, díky zachování protikorozních vlastností svarového kovu. Při svařování uhlíkových ocelí je takto možno svařovat až do tloušťky plech 8 mm. ^[10]



Obr. 2.1.10 Plazmou bez přídavného materiálu svařovaný výfuk z materiálu X2CrMoTi17-1 ^[10]

Svařování hliníkových slitin metodou 151

Při svařování hliníkových slitin se setkáváme se specifickými problémy. Jedná se zejména o vytváření oxidické vrstvy na povrchu materiálu, vysoká tepelná vodivost s vysokým koeficientem tepelné roztažnosti, sklon k tvorbě pórů a u některých slitin sklon k trhlinám za tepla. Tyto problémy kladou mimořádné nároky na proces svařování, které metody obloukového svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu (131) a obloukového svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu splňují s obtížemi nebo až nedostatečně. Naproti tomu se metoda 151 hodí ke svařování hliníkových slitin velmi dobře. Pomocí této metody lze spojovat i hliníkové odlitky z materiálu AC- AlSi7Mg0,3 při tloušťce 10 mm v místě spáry. Při této aplikaci může svařovací čas klesnout až na 1/25, v porovnání se svařováním metodou 131, což je dáno v důsledku procesně integrovaného předehřívání. Počet svařovaných vrstev klesá ze 4 na 1 a výrazně se zvyšuje svařovací rychlost. Při svarovém spojování plechů o tloušťce 4 mm a profilu z materiálu AW-6063A

se dále vyznačují vynikající aktivací povrchu dílců a minimální pórovitostí ve svarovém kovu. Svařovací rychlost je zde nad 100 mm.min^{-1} . [11]

Mikroplazmové svařování

Tento druh plazmového svařování se používá pro svařování tenkých plechů, drátů, fólií, sítí aj. polotovarů. Nejčastěji se touto metodou svařují nelegované, nízko a vysoce legované oceli, nikl, hliník, zinek, měď, zlato, titan, zirkon a jejich slitiny, popř. i jiné speciální materiály. Je také možné svařovat povlakované plechy a plazmově pájet pozinkované plechy. [12]



Obr. 2.1.11 Příklad použití mikroplazmového svařování [12]

2.2 Elektronové svařování (51)

Tato metoda svařování byla poprvé využita v roce 1967 při svařování částí kosmické lodi Sojuz 6^[3]. V současné době je tato metoda rozšířena ve všech strojních oborech,

největší roli však zaujímá v oblasti jaderné i klasické energetiky a oblasti kosmické a letecké techniky^[2]. Jedná se o tavné svařování, kde zdrojem tepla je na svařovaný materiál dopadající fokusovaný proud vysoce urychlených elektronů.^[13]

2.2.1 Princip metody

Elektrony jsou subatomární částice se záporným elektrickým nábojem, které tvoří obal atomu. Volné elektrony se získají rozžhavením kovové katody, která elektrony emituje. Urychlení elektronů se realizuje elektrickým polem o velkém rozdílu potenciálů mezi katodou a anodou. Zaostřování elektronů se provádí pomocí elektromagnetické čočky. Celý tento proces tvorby řízeného elektronového paprsku se uskutečňuje v elektronovém děle. Elektronový paprsek se dále pohybuje z elektronového děla na svařovaný materiál s maximální hustotou energie $5 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Vychylovací cívka, která může být uložena za elektromagnetickou čočkou, umožňuje vychylování paprsku, což umožňuje jemné nastavení polohy dopadu paprsku (*Obr. 2.2.1*). Kinetická energie volných elektronů se odevzdává atomům základního materiálu, čímž se na materiálu zvyšuje teplota až na $(5000 \div 6000)^\circ\text{C}$. Pro zabezpečení volné letu elektronů od katody až na základní materiál se svařování provádí ve vysokém vakuu až $5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$.



Obr. 2.2.1 Zařízení pro svařování elektronovým paprskem ve vakuu^[14]

Při svařování metodou 51 se nejčastěji používá svařování „klíčovou dírkou“, bez přídavného materiálu. Svar může mít hluboký průvar s poměrem šířka : hloubka 1 : 30 a více. Maximální dosažená hloubka svaru je okolo 300 mm. ^{[15] [16]}



Obr. 2.2.2 Svar provedený elektronovým svařováním ^[17]

2.2.2 Svařovací zařízení

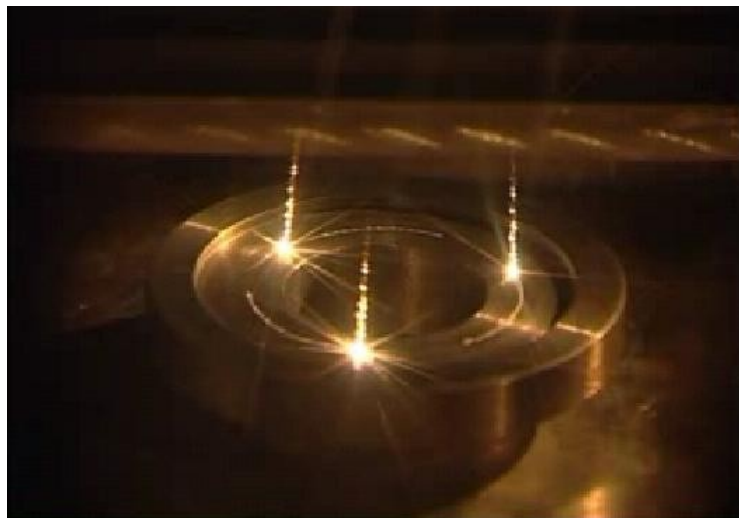
Elektronové dělo

Jedná se o zařízení, ve kterém vzniká elektronový paprsek. Elektronové dělo se skládá z wolframové nebo tantalové katody, řídicí elektrody, která řídí proud elektronového svazku. K urychlení elektronů slouží katoda, která v elektronovém děle následuje po řídicí elektrodě. Elektronové dělo dále obsahuje fokusační čočku, která je elektromagnetická a paprsek, dle potřeby, zaostřuje do různých ohniskových vzdáleností pomocí změny proudu. Pro monitorování procesu svařování a místa dopadu elektronového paprsku slouží pozorovací okulár, který bývá umísťován do prostoru mezi anodou a fokusační čočkou. Prostor v elektronovém děle je vakuován na tlak $5 \cdot 10^{-4}$ Pa, který je nezbytný pro zajištění termoemise elektronů, tepelné a chemické izolaci katody a zamezení vzniku oblouku mezi elektrodami. ^[2]

Vychylovací cívka

Jedná se o elektromagnetickou cívku, kterou lze zfokusovaný elektronový paprsek vychylovat. Vychylováním lze paprsek přesně nasměřovat do místa svaru, aniž by bylo třeba použít manipulátor. Při použití dostatečně rychlé vychylovací cívky lze paprsek rozštěpit, např. i na 60 samostatných paprsků, které svařují současně. Množství paprsků je limitováno pouze celkovým výkonem paprsků. Vícepaprskovým svařováním lze

dosáhnout, při systematickém rozložení energie, snížení deformace součásti, navíc narůstá produktivita při svařování. ^[18]



Obr. 2.2.3 Vícepaprskové svařování ^[16]

Pracovní komora

Nejvíce limitujícím prvkem této metody svařování je pracovní komora. Dle její velikosti se odvíjí max. velikost svařované součásti. Dle výplně pracovní komory norma ČSN EN ISO 4063 rozděluje metodu 51 na metody:

- Elektronové svařování ve vakuu (511)
- Elektronové svařování v atmosféře (512)
- Elektronové svařování s přidavkem ochranných plynů (513)

Metoda 511 je v drtivé většině nejpoužívanější, ostatní metody se používají jen zřídka. Prostor pracovní komory je vakuován na tlak až $5 \cdot 10^{-3}$ Pa, což je prováděno difúzními nebo turbomolekulárními vývěvami, doba čerpání je výrobně neproduktivní a může trvat, u velkých komor, až několik desítek hodin. Moderní svařovací zařízení mohou obsahovat předkomory, ve kterých se provádí navážení a vakuování součásti v době svařování jiné součásti, čímž se výrazně sníží neproduktivní doba výroby při čekání na tvorbu vakua. Pomocí sekundárních elektronů, které vznikají dopadem elektronů na povrch svařované součásti, lze monitorovat svařovací proces, korigovat a směřovat paprsek. K tomu je třeba, aby v komoře byl nainstalován detektor sekundárních elektronů. Oproti používání

pozorovacího okuláru má toto zařízení výhodu hlavně v možnosti dodávání potřebných dat k počítačem řízenému procesu svařování.



Obr. 2.2.4 Vakuová komora o rozměrech $7 \times 7 \times 14$ m ^[19]

2.2.3 Parametry svařování

Svařovací parametry pro elektronové svařování předepsané normou ČSN EN ISO 15609-3:

- Urychlovací napětí v kilovoltech (kV)
- Proud svazku v miliampérech (mA) (parametry pulzace, pokud je použita)
- Proud/y fokusační čočky v ampérech (A), proud řídící jednotky pro nastavení nebo polohu ohniska vzhledem k povrchu výrobku
- Vychylování svazku:
 - 1) Stejnoseměrný proud vychylování (DC), rozměry na povrchu výrobku
 - 2) Střídavý proud vychylování (AC), tvar a orientace vzhledem k směru svařování, frekvence v herzech (Hz), rozměry (mm vychýlení)

- Překrytí, náběh a snižování výkonu (v sekundách (s), milimetrech (mm) nebo stupních (deg))
- Průběh výkonu
- Směr pohybu
- Rychlost pohybu povrchu (mm/min nebo mm/s)
- Rychlost pohybu s detaily zrychlení a zpomalení (pokud je to nutné)
- Rychlost podávání přídavného drátu, směr, poloha a úhel
- Pracovní vzdálenost v milimetrech (mm) a/nebo pracovní vzdálenost elektronového děla
- Tlak v elektronovém děle v Pascalech (Pa) nebo milibarech (mbar)
- Tlak v pracovní komoře v Pascalech (Pa) nebo milibarech (mbar)

2.2.4 Výhody a nevýhody elektronového svařování

Výhody ^[5]

- Vysoká čistota svaru dána vakuovým přetavením kovu
- Svařování materiálů s vysokou teplotou tavení a žárovevných slitin
- Vysoká produktivita svařování
- Velmi úzký průřez svaru s hloubkou průvaru až 300 mm
- Svarový spoj s velmi úzkou tepelně ovlivněnou oblastí
- Minimální deformace svařované součásti
- Svařování bez přídavného materiálu

Nevýhody ^[5]

- Vznik zdraví škodlivého rentgenového záření

- Vysoká pořizovací a provozní náklady za zařízení
- Nutnost dokonalého očištění svařovaných součástí od olejů, tuků, oxidů aj. nečistot a odmagnetizování slitin železa
- Nutnost dokonalé přípravy svarových ploch s drsností $Ra = (0,8 \div 1,6)$ a ustavení svarových ploch na mezeru do 0,1 mm

2.2.5 Aplikace elektronového svařování

Elektronové svařování si i přes značnou finanční náročnost vydobylo pevné postavení v mnoha významných průmyslových odvětvích, jako je např. v automobilovém, jaderném, kosmickém a leteckém průmyslu. Je to dáno některými charakteristickými a unikátními vlastnostmi, které u jiných metod svařování nenalezneme.

Touto metodou svařování lze dosáhnout svarů nejvyšší možné kvality s minimálními deformacemi a napětím ve svaru. Svařovací zařízení je však velmi nákladné na pořízení a provoz, proto se metoda používá při svařování, hlavně speciálních slitin, popř. v případech speciálních požadavků na vlastnosti svarového spoje. Je možné svařovat různorodé materiály i materiály s velmi rozdílnými tloušťkami.



Obr. 2.2.5 Svarový spoj tloušťky 30 mm v kombinaci ocel – bronz ^[16]

	Ag	Al	Au	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr
Zr	5	5	5	5	3	5	5	5	5	3	5	5	1	5	5	5	5	5	2	1	5	5	
W	3	5	4	5	4	5	1	3	5	3	3	1	1	5	3	1	5	3	1	2	1		
V	3	5	3	5	4	5	3	3	1	4	5	1	1	5	4	5	3	5	5	1			
Ti	2	5	5	5	5	5	1	5	5	3	5	1	1	5	5	5	5	5	1				
Ta	5	5	4	3	4	5	5	3	5	4	5	1	1	5	4	5	5	5					
Sn	2	2	5	3	2	5	2	2	5	5	5	3	5	5	2	5	3						
Re	3	4	4	5	4	1	1	3	5	4	4	5	5	3	4	2							
Pt	1	5	1	5	5	1	2	1	1	5	5	2	5	1	5								
Pb	2	2	5	4	2	2	2	2	2	5	2	3	4	2									
Ni	2	5	1	5	3	1	2	1	2	5	5	5	5										
Nb	4	5	4	5	4	5	5	2	5	4	5	1											
Mo	3	5	2	5	4	5	1	3	2	3	3												
Mn	2	5	5	5	3	2	2	1	2	5													
Mg	5	2	5	5	1	5	5	5	3														
Fe	3	5	2	5	3	2	2	2															
Cu	2	2	1	5	5	2	2																
Cr	2	5	3	5	3	2																	
Cd	3	5	2	5	3																		
Be	5	2	5																				
Au	1	5																					
Al	2																						
Ag																							

1 Svařitelnost zaručena

2 Podmíněná svařitelnost – ověřeno

3 Podmíněná svařitelnost – nedostatečně ověřeno

4 Podmíněná svařitelnost – nepodloženo daty

5 Nesvařitelné

Tab 2.2.1 Svařitelnost kombinací vybraných kovových materiálů elektronovým svařováním ^[5]

Svařování částí pláště rakety Ariane

Při této aplikaci bylo potřeba svařit dvě polokruhové desky z hliníkové slitiny, o průměru 6 m a tloušťce 70 mm. Svařený kruh byl následně namáhán deformačním cyklem při procesu tváření na tvar polokoule. Výsledný svařenec měl tak minimální pnutí, že nebylo potřeba aplikovat tepelné zpracování k jeho odstranění.

Svařování převodových kol

Jedná se o nejčastější aplikaci metody 511 v automobilním průmyslu. Je to dáno možností svařovat nahotovo obrobena ozubená kola nebo svařování hřídele a příruby ve finální fázi výroby. Deformace, vznikající při tuhnutí svarového kovu, jsou tak malé, že je možné tvarové deformace udržet v mezi tolerance. Použitím vhodného vícepraskového svařování lze minimalizovat ovalitu, která zvyšuje hladinu hluku zařízení. Svařovaná ozubená kola

mohou být i zakalená, nutné je však před svařováním v místě svaru odstranit cementovanou vrstvu.

Svařování tlakových senzorů

Na tlakové senzory vstřikovacího systému Common Rail jsou kladeny požadavky na odolnost vysokých tlaků v řádu 2000 bar, což vyžaduje hluboký svar, a nutnou přítomnost citlivé polovodičové vrstvy, která je umístěna v bezprostřední blízkosti svaru. Tyto požadavky byly splněny při aplikaci metody 511, díky níž bylo při svařování hlubokého svaru minimalizované vnesené teplo, aby nedošlo k znehodnocení polovodičové vrstvy. ^[18]

2.3 Laserové svařování (52)

První významné použití této metody svařování bylo v roce 1976 společností General Motor, která touto metodou začala svařovat ventily motorů automobilů^[3]. Postupem času se metoda rozšířila hlavně do odvětví výroby elektrotechniky, zdravotního zařízení a strojírenství. Ve strojírenství je metoda nejvíce rozšířena v oblasti automobilního průmyslu, díky své vysoké produktivitě. Jedná se o tavné svařování, kde zdrojem tepla je opticky soustředěný svazek fotonů produkovaný laserem. Podle druhu aktivního prostředí, ve kterém vzniká laserové záření, nám norma ČSN EN ISO 4063 rozděluje metodu 52 na metody svařování:

- Laserové svařování pevnolátkovými lasery (521)
- Laserové svařování plynovými lasery (522)
- Laserové svařování diodovými lasery (523)

Pevnolátkové lasery mají širokou oblast použití. V režimu pulzního svařování se touto metodou svařuje v elektronice, výrobě měřidel aj. oblastí strojírenství s nárokem na vysokou jakost svarového spoje. Při kontinuálním režimu se využívá hlavně možnost hlubokého průvaru, vysoké produktivity a malých deformací, což je oceněno hlavně v automobilním průmyslu. ^[20] Od devadesátých let minulého století tato skupina laserů prochází dynamickým vývojem. Vývoj se týká hlavně zvyšování výkonu, účinnosti a vývoje druhů nových laserových zařízení. ^[21]

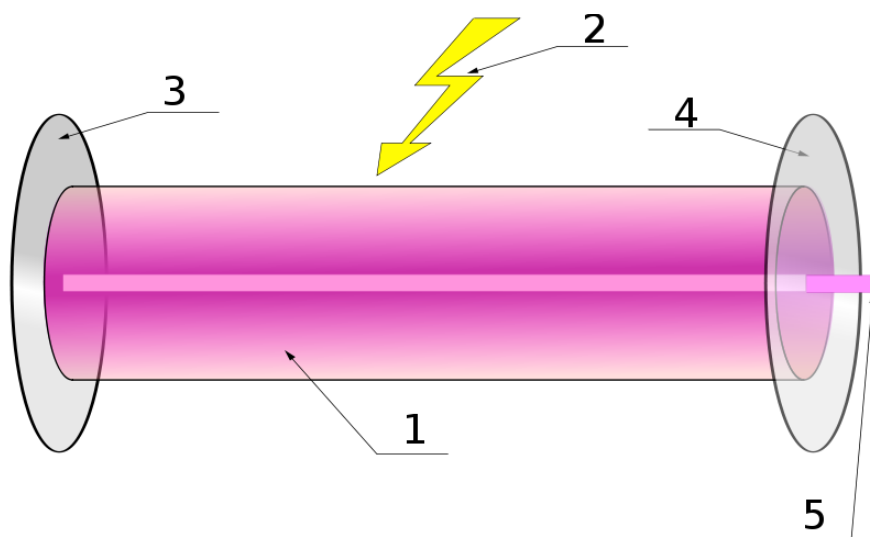
Plynové lasery se nejběžněji uplatňují ve výrobních technologiích vyžadujících např. hluboký průvar, přeplátovaných spojů. Jedná se o lasery s výkonem v řádu desítek kW.

Hlavní výhodou je vysoký výkon a dobře technicky zvládnuté svařovací zařízení. Doprava laserového paprsku do místa svaru je náročnější, než u pevnolátkových a diodových laserů, jelikož jí lze řešit pouze soustavou zrcadel, což se projevuje hlavně na velikosti zařízení.

Diodové lasery se vyznačují zvýšenou účinností a kompaktností zařízení. Jelikož mají špatnou kvalitu svazku paprsku, používají se hlavně ke svařování plastů aj. materiálů s nízkou teplotou tavení.

2.3.1 Princip metody

Laser je optický zdroj koherentního, monochromatického elektromagnetického záření. Tento laser vzniká v aktivním prostředí za pomoci budícího zdroje energie. Aktivní prostředí je ohraničeno odrazovým a polopropustným zrcadlem, abychom při buzení dosáhli paprsku požadovaných vlastností. Laser vystupuje polopropustným zrcadlem a jeho rychlost se blíží rychlosti světla (*Obr. 2.3.1*). ^[22]



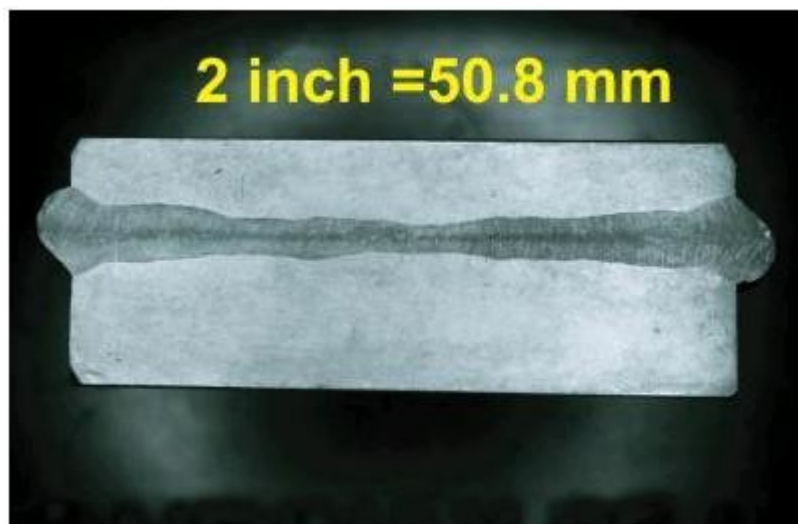
Obr. 2.3.1 Konstrukce laseru ^[23]

1 - aktivní prostředí, 2 – budící zdroj energie, 3 - odrazné zrcadlo, 4 - polopropustné zrcadlo,
5 - laserový paprsek

Laserový paprsek je dále přenášen zrcadly nebo optickým kábelem do aplikační hlavy, kde je paprsek zaostřen do místa svaru. Při dopadu paprsku na svařovaný materiál se část záření odrazí, část projde materiálem a část je absorbována, čímž jej silně ohřívá. Ve většině případů se zde používá svařování „klíčovou dírkou“. Druhá možnost je pulzní

svařování, u kterého „klíčová dírka“ nevzniká. Proces je chráněn před oxidací ochrannou atmosférou, navíc vyfoukává plazmu z otvoru, čímž zvyšuje účinnost procesu.

Tvar tuhého svarového kovu, získaného kontinuálním režimem svařování, je podobný, jakou u svarového kovu získaného elektronovým svařováním, nicméně však nedosahuje tak velikých průvarů (*Obr. 2.3.2*). Při pulsním režimu svařování získáme svar mnohem menšího průvaru.



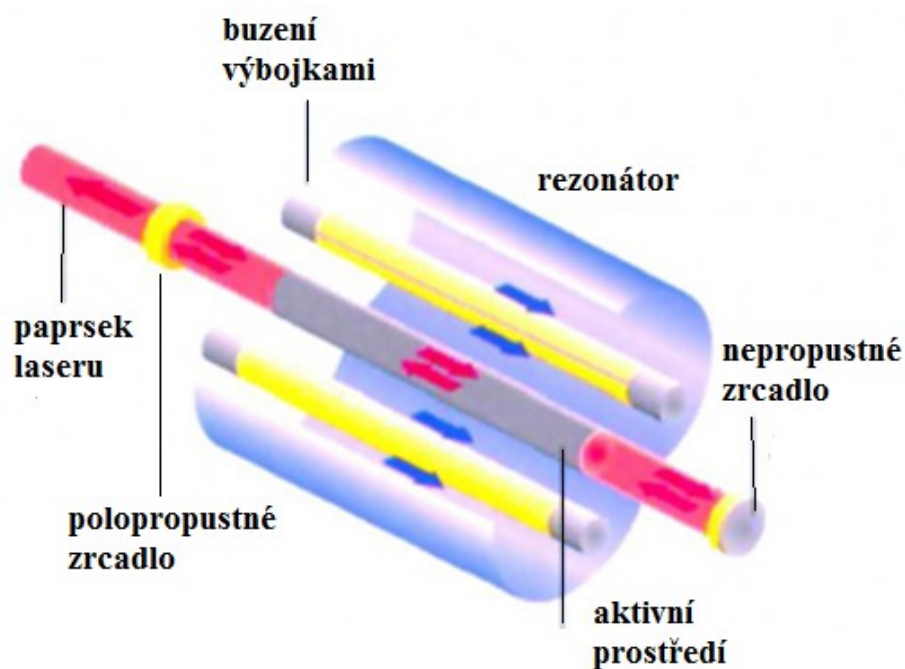
Obr. 2.3.2 Svar provedený laserovým svařováním, metodou klíčové dírky ^[21]

2.3.2 Svařovací zařízení

V dnešní době máme velké množství druhů laserů, a nelze říci, že by jeden z nich byl optimální pro zpracování veškerého materiálu. Každý druh má svůj potenciál, který je nutné cíleně využívat pro příslušnou aplikaci. ^[24]

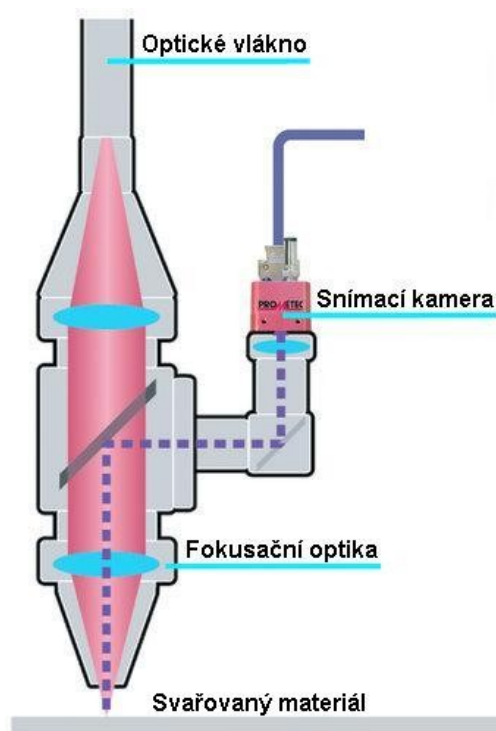
Laserové svařování pevnolátkovými lasery

Nejpoužívanější druhem laseru v této skupině je Nd: YAG laser. Aktivní prostředí Nd: YAG laseru tvoří výbrus krystalu Yttrium Aluminium Granátu ($Y_3Al_5O_{12}$) dopovaný ionty neodymu (Nd^{3+}). Ten je osvětlován budícími xenonovými výbojkami. Rezonátor je tvořen pokovenou dutinou, ve které jsou vloženy výbojky a aktivní prostředí. Účelem pokovené dutiny je, aby byla většina světla odrážena zpět do krystalu, čímž se zvýší účinnost tvorby paprsku (*Obr. 2.3.3*).



Obr. 2.3.3 Konstrukce Nd:YAG laseru ^[2]

Paprsek je dále přenášen optickým káblem do aplikační hlavy, ve které je paprsek zaostřen pomocí zaostřovací čočky. Přes aplikační hlavu je na ochranu svarové lázně přiváděn ochranný plyn. Pomocí snímací kamery a systému zrcadel lze monitorovat svařovací proces, popř. přesně nastavovat polohu dopadu laserového paprsku (Obr. 2.3.4).



Obr. 2.3.4 Aplikační hlava pro laserové svařování ^[25]

Pevnolátkové lasery rozdělujeme podle buzení laseru na: ^[26]

I. generace – buzené výbojkami

II. generace – buzené diodami

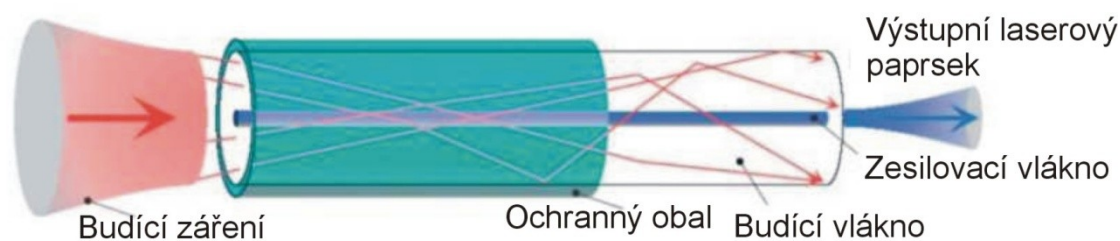
III. generace – diskové lasery

Zařízení I. generace jsme si již popsali výše. Vyznačují se nižší investiční náročností, ale dražším provozem, z důvodu časté výměny výbojek. Účinnost je okolo 5% a výkon do 6 kW.

Zařízení II. generace je shodné se zařízením I. generace, avšak neobsahuje výbojky, které jsou nahrazeny diodami. Účinnost je zvýšena až na 30%,

Zařízení III. generace přichází s novou konstrukcí laserového zařízení uspořádaného do disku. Tyto lasery mají okolo 15% účinnosti s výkonem až 4 kW. Lasery se dají zapojovat do série, čímž lze získat výkon až 16 kW. ^[27]

Vláknové lasery jsou konstrukčně nové pevnolátkové lasery s příčným buzením. Aktivní prostředí zde tvoří vlákno s extrémní štíhlostí, tvořené atomy vzácných zemin jako Yterbium, Erbium, Thulium. Buzení je prováděno diodami, které jsou na vlákno navázány pomocí optických odbočnic. Tyto zařízení dosahují výkonu až 50 kW s až 30% účinností. Výhodou je navíc kompaktnost a nízké provozní náklady zařízení. ^[28]



Obr. 2.3.5 Princip vláknového laseru ^[26]

Laserové svařování plynovými lasery

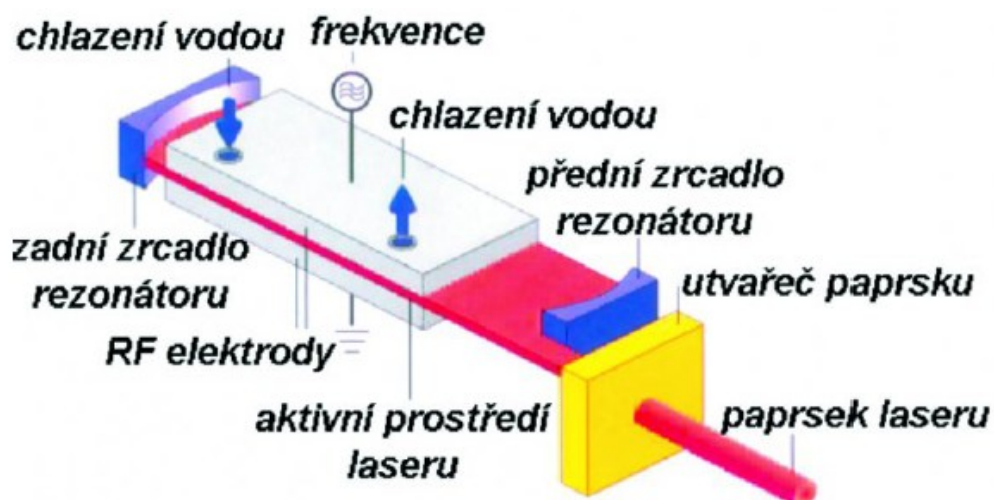
Nejpoužívanějším a nejvýkonnějším laserem této metody svařování patří CO₂ lasery.

Aktivní prostředí je u nich tvořeno směsí plynů He + N₂ + CO₂, která je uzavřena ve skleněné trubici. Aktivní prostředí je buzeno nejčastěji doutnavým nebo

vysokofrekvenčním výbojem, což se řídí směrem proudění plynu v aktivním prostředí.

Plyn aktivního prostředí je chlazen průchodem přes chladič při nuceném oběhu. U nových

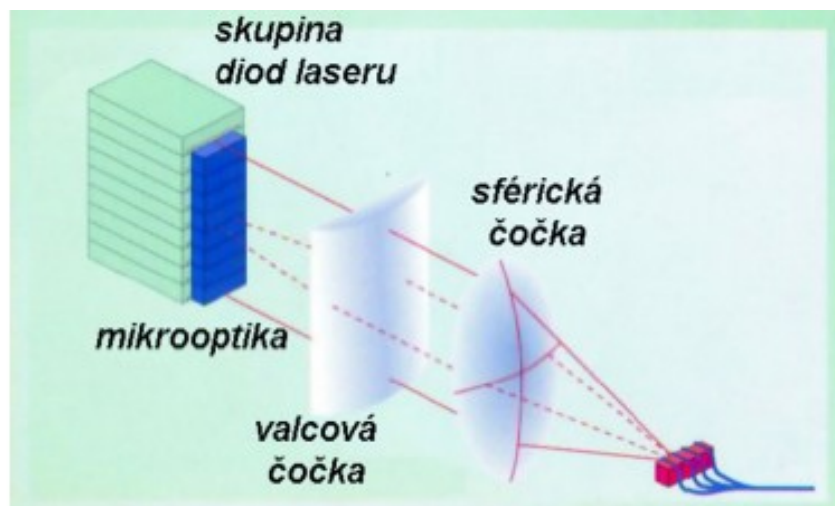
typů zdrojů chlazení probíhá difúzně, pomocí vodou chlazených deskových elektrod (*Obr. 2.3.6*), díky čehož se sníží spotřeba plynu aktivního prostředí. Plynové lasery mohou dosahovat výkonu až 200 kW a účinnosti až 20 %. ^[2] Kvůli vlnové délce paprsku je nutné laserový paprsek transportovat do místa svaru pomocí systému zrcadel.



Obr. 2.3.6 Konstrukce plošného CO₂ laseru ^[29]

Laserové svařování diodovými lasery

Aktivní prostředí je tvořeno blokem laserových diod, který je buzen svazkem elektronů. Svazek paprsku dále musí procházet systémem čoček, který jej vytvaruje (*Obr. 2.3.7*). Lasery mají výstupní výkon 30 W až 8 kW a až 55% účinnost. Vysoce výkonné diodové lasery mají výstupní paprsek s obdélníkovým průřezem, což nám velmi zhoršuje kvalitu paprsku, která neumožňuje dosáhnout vysoké hustoty energie.



Obr. 2.3.7 Diodový laser buzený svazkem elektronů ^[30]

2.3.3 Parametry svařování

Svařovací parametry pro laserové svařování předepsané normou ČSN EN ISO 15609-4:

- Výkon laserového svazku na výrobku
- Parametry pulzu, pokud je pulzace používána: špičkový výkon; energie pulzu; opakovací frekvence; délka pulzu; tvar pulzu
- Detail náběhu a snižování výkonu, pokud je použito
- Detaily stehování
- Diagram pulzace: amplituda, frekvence a čas prodlevy (pokud je použito)
- Orientace laserového svazku, polarizace a poloha vzhledem ke spoji a směru svařování: úhel (ve dvou směrech); poloha v příčném směru (pokud je to vhodné)
- Rychlost pohybu
- Rychlost pohybu s detaily zrychlení a zpomalení, pokud je to nutné
- Rychlost podávání přídatného drátu, směr, poloha a úhel
- Průtočné množství plynu
- Kontrola čistoty plynu
- Postup čištění plynu
- Pracovní vzdálenost
- Tvar a rozměr svazku na výrobku
- Plocha a orientace trysky s ochranným plynem vzhledem k výrobku
- Šířka a výška jednotlivých vrstev (u navařování)
- Vzdálenost nebo procentuální vyjádření překrytí (u navařování)

2.3.4 Výhody a nevýhody laserového svařování

Výhody ^{[2] [31]}

- Vysoká produktivita procesu, bez aplikace přídavného materiálu
- Úzký svar s hlubokým průvarem o tloušťce až 50 mm
- Malé množství vneseného tepla do svaru
- Svarový kov vysoké jakosti, bez možnosti znečištění materiálem elektrod
- Možnost svařovat ve velmi těžko dostupných místech
- Svařitelnost velkého množství druhů a kombinací materiálů
- Snadná automatizace procesu
- U tenkých plechů možnost svařování bez ochranné atmosféry

Nevýhody ^{[2] [31]}

- Vysoké pořizovací a provozní náklady zařízení
- Nízká mobilita a flexibilita robotizovaného zařízení
- Nutnost kvalitního ustavení svarových ploch vůči sobě

2.3.5 Aplikace laserového svařování

V dnešní době se zvyšuje používání laserového svařování, což je způsobeno vysokou produktivitou procesu, kvalitou svarového spoje, malým vneseným teplem do svarového spoje a hlavně snižující se cenou svařovacího zařízení. Touto metodou lze svařovat velké spektrum kovových materiálů a jejich kombinací (*Tab. 4.1*).

	W	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Be	Fe	Pt	Ni	Pd	Cu	Au	Ag	Mg	Al	Zn	Cd	Pb
Sn	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	5	4	4	5	5	5	5	4
Pb	5		5	5	5	5		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Cd				5	5	5		5	4	4	4	5	4	3	2	5	5		
Zn	5		5	5	4	5	5	4	5	4	4	3	4	3	5	4			
Al	5	5	5	5	4	4	5	4	5	4	5	4	4	4	4				
Mg	5		5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4					
Ag	5	5	5	5	5	4	5	5	4	5	2	4	2						
Au			5	4	5	4	4	4	2	2	2	2							
Cu	5	5	5	5	4	4	4	4	2	2	2								
Pd	4	3	3	3	2	4	4	3	2	2									
Ni	4	3	4	3	2	4	4	3	2										
Pt	3	4	3	3	2	4	5	3											
Fe	4	4	3	2	2	4	4												
Be	5	5	5	5	4	5													
Ti	4	2	2	3	4														
Co	4	5	4	3															
Cr	2	5	2																
Mo	2	2																	
Ta	2																		

2 - velmi dobrá

3 - dobrá

4 - částečná

5 - špatná

Tab. 2.3.1 Svařitelnost kombinací vybraných kovových materiálů laserovým svařováním ^[32]

Svařování termočlánků

Termočlánky jsou při provozu často tepelně namáhány, navíc je požadována nulová četnost poruch. Aby bylo dosaženo těchto požadavků je nutné při jejich konstrukci volit vhodné materiály, které mohou být i různorodé. Z důvodu poruch termočlánků vlivem jejich malé pevnosti a nové konstrukce byla stávající technologie výroby pájením nahrazena, v rámci experimentu, laserovým svařováním.

Nejprve bylo třeba spojit dva měděné drátky tl. 1 mm s jedním platinovým o tl. 0,2 mm. Pro svaření těchto drátků byl použit pevnolátkový Nb: YAG laser v pulsním režimu s max. výkonem 550 W. Platinový drátek byl vložen mezi dva měděné a jedním výstřelem došlo ke spojení všech tří drátků. Při tomto spojení byla splněná požadovaná pevnost.

Při svařování pouzdra termočlásku z materiálu X6CrNiMoTi17-12-2, bylo třeba dosáhnout jeho hermetického uzavření. Termočlánek však nesměl být provařen, jelikož byl naplněn oxidem hořečnatým. Při výrobě tohoto spoje byl použit stejný postup, jako u předchozího spoje. [33]

Svařování karosérie vozu Volkswagen Golf

Svařování této karosérie je jedním z ukazatelů výhodnosti použití laserového svařování v odvětví automobilového průmyslu, když se po jeho aplikaci karosérii výrazně zvýšila tuhost. O výhodnosti svědčí i to, že na jeho karosérii 4. generace bylo vytvořeno dohromady 6 m svaru, zatímco na 5. generaci již 72 m, což je dvanáctinásobek. [28]

2.4 Třecí svařování s promíšením (43)

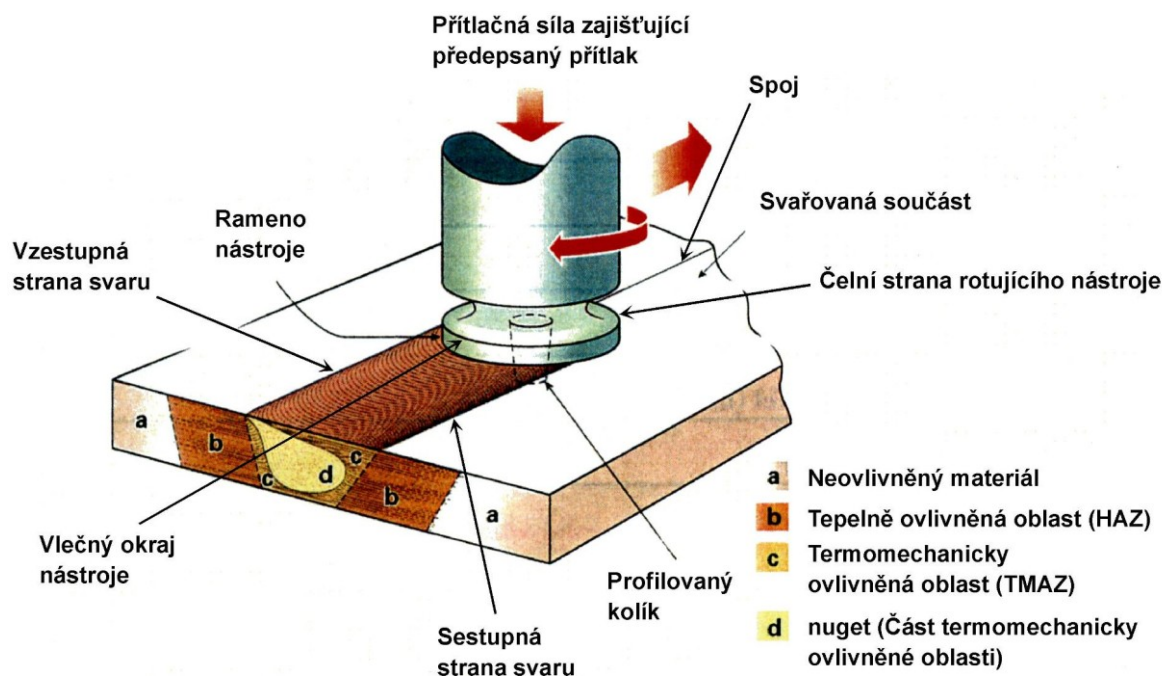
Metoda třecího svařování s promíšením byla poprvé představena roku 1991. Na vývoji metody se nejvíce podílely instituce TWI a Národní úřad pro letectví v Americe (NASA). Během dvaceti let si tato metoda našla neodmyslitelné uplatnění v odvětví letectví a kosmonautiky, dále také v oblasti dopravy, stavebnictví a elektrotechniky. V současné době patří mezi nejrychleji se rozvíjející a nejperspektivnější metodám svařování^[4]. Běžně se tato metoda označuje Friction Stir Welding (FSW).

2.4.1 Princip metody

Jedná se o metodu třecího svařování, kdy svar je tvořen působením rotujícího nástroje, speciální konstrukce. Funkční části tohoto nástroje, podílející se na svařování, se nazývají nástrojové rameno a profilovaný kolík. Při svařování se nejprve otáčející nástroj pomalu ponořuje do místa spoje, nejčastěji až do setkání čela ramena nástroje s povrchem základního materiálu. Teplo vzniklé třením mezi svařovacím nástrojem a základním materiálem způsobuje, že základní materiál může změkknout, aniž by dosáhl bodu tavení. Zde dochází k promíchávání a deformaci základního materiálu v místě budoucího svaru. Následným posuvem nástroje po ose budoucího svaru vzniká svarový spoj.

Touto metodou svařování lze vytvářet tupé svary a přeplátované spoje. V případě vhodné úpravy svarových ploch je možné vytvářet i koutové svary. Bez větších obtíží je možné svařovat materiály o tloušťce (1,2 ÷ 50) mm, lze však svařovat i plechy o tloušťce

0,8 mm. Byly vytvořeny i svary s tloušťkou 75 mm z Al slitiny třídy 6000. V případě spojování materiálů větších tlouštěk je možné použít oboustranný svar.



Obr. 2.4.1 Princip třecího svařování s promíšením [34]

Mikrostruktura spoje

Svarový spoj lze rozdělit na čtyři odlišné oblasti, jejichž tvar je závislý na materiálu, typu nástroje a svařovacích parametrech. Oblasti dělíme na:

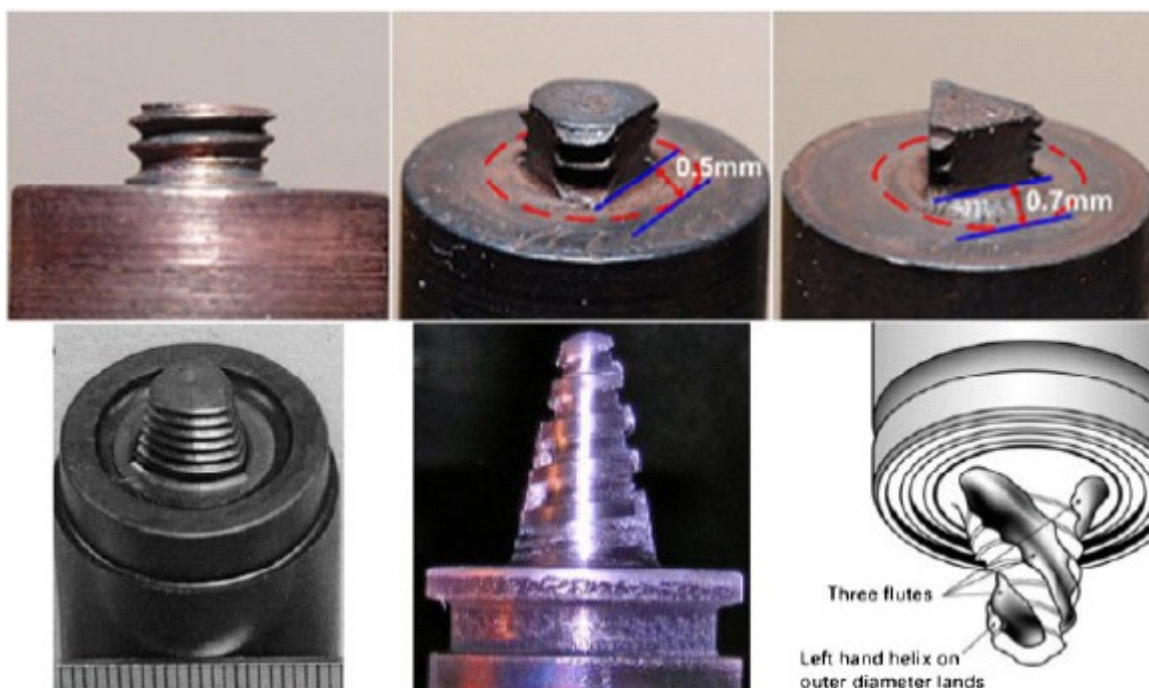
- Neovlivněná oblast** – struktura a vlastnosti materiálu nejsou výrazně ovlivněny teplotním cyklem.
- Tepelně ovlivněná oblast (HAZ)** – výrazné změny mikrostruktury způsobené nárůstem teploty. Dochází zde k výraznému snížení tvrdosti.
- Termomechanicky ovlivněná oblast (TMAZ)** – materiál je tepelně ovlivněn a plasticky deformován. Velikost původního zrna je zachována, ale v deformovaném stavu.
- Nugget (DXZ)** – struktura materiálu je silně deformována, nejběžnější velikost zrna je menší než 1 μm .



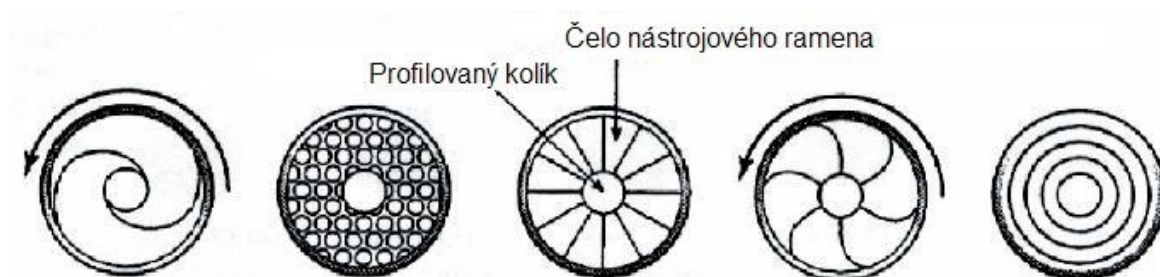
Obr. 2.4.2 Mikrostruktura svarového spoje vyrobeného třecím svařováním s promíšením^[34]

Svařovací nástroj

Konstrukce nástroje má zásadní vliv především na kvalitu svarového spoje, jeho mechanické vlastnosti a produktivitu metody. Tvar nástroje je vždy optimalizován s ohledem na svařovaný materiál a jeho tloušťku, parametry svařování a typ spoje. Nástroj je vyráběn z materiálu odolného proti opotřebení s dobrými statickými a dynamickými vlastnostmi za vyšších teplot, který mu musí zaručovat vysokou životnost. Nejčastěji měnící se částí nástroje je profilovaný kolík, jehož délka zhruba odpovídá hloubce průvaru. Kolík má nejčastěji válcový nebo kuželový tvar s různými průřezy, jako jsou i trojúhelníkový, čtvercový, lopatkovitý a mnoho dalších. Pro ovlivnění toku zplastizovaného materiálu, snížení odporu proti vnikání nástroje do materiálu a zlepšení průchodnosti nástroje materiálem se místo válcového tvaru kolíku častěji používá tvar kolíku kuželový. Na kolíku bývá často navinut obvodový závit, který má příznivý vliv na tok materiálu a čistotu svarového kovu, jelikož je schopen rozrušovat a rozptylovat povrchovou vrstvičku oxidů (Obr. 2.4.3). Na formování svarového spoje má vliv čelo nástrojového ramena, které může být hladké nebo i tvořeno drážkami různých tvarů a uspořádání (Obr. 2.4.4). Pro svařování přeplátovaných spojů lze použít nástroje určené ke svařování tupých svarů, je však nutné počítat s některými nežádoucími jevy, jako je např. zeslabování tloušťky horní spojované součásti a potíže s odstraněním oxidické vrstvy na rozhraní spojovaných součástí. Z tohoto důvodu byly vyvinuty a jsou používány nástroje určené ke svařování přeplátovaných spojů.



Obr. 2.4.3 Ukázka tvarů profilovaných kolíků ^[35]



Obr. 2.4.4 Ukázka variant tvarů čel nástrojového ramena ^[34]

2.4.2 Svařovací zařízení

Principiálně vychází svařovací zařízení z konstrukce konvenčních frézek. U těchto strojů jsou však kladeny nároky na zvýšení výkonů (Tab. 2.4.1) a celkovou tuhost konstrukce stroje a upínacího zařízení. Při svařování zvláště tenkých konstrukcí jsou velkým problémem velké síly při svařování, které je možné snižovat vysokými otáčkami vřetene (až 18 000 ot/min), což může být další požadavek na svařovací zařízení.

Typ zatížení	Metoda 43	Frézování
Síly ve směru osy vřeteníku [kN]	14	1,4
Síly působící proti pohybu [kN]	1,5	0,08
Potřebný výkon [kW]	3,4	1,8
Hodnoty byly získány svařováním a frézováním Al slitiny třídy 6000 (slitina typu Al-Mg-Si) s použitím typických parametrů pro danou metodu a zkušebních vzorků stejného materiálu a tloušťky.		

Tab. 2.4.1 Srovnání silových požadavků metody 43 s klasickým frézováním ^[34]

Jedním z nejdůležitějších aspektů pro dosažení kvalitního svarového spoje je řízení relativní polohy svařované součásti vůči nástroji. V dnešní době lze tuto polohu řídit pomocí zpětné vazby na data získané z modulu pro monitorování parametrů procesu. Dříve se také osvědčil jednoduchý systém přitlačných kladek, které zajišťoval, aby se nástroj nedostal příliš hluboko do svařovaného materiálu.

V dnešní době již existuje celá řada komerčně vyráběných strojů pro tuto metodu svařování. Nejčastěji se jedná o stroje se svařovacím pohybem nástroje v jedné ose na svařování sestav typu panel a nádrží. Dále se používají stroje s dvou a více osami pohybu nástroje při svařování a svařovací stroje, kde se nástroj pohybuje pomocí robotického ramena.



Jednoosé svařovací zařízení



Dvouosé svařovací zařízení



Tříosé svařovací zařízení



Víceosé robotické svařovací zařízení

Obr. 2.4.5 Ukázka komerčně vyráběných svařovacích zařízení firmy Hitachi America Ltd. [36]

Výzkumnými a vývojovými aktivitami v oblasti technologie FSW se v České republice v současné době zabývá především Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. v rámci projektu MŠMT 1M0501 - Centrum leteckého a kosmického výzkumu. Vzhledem k vysokým cenám specializovaných FSW strojů, byla ve společnosti, k získání zařízení, zvolena cesta jednoduché adaptace dvou frézovacích strojů. Prvním z nich je manuálně řízená konzolová frézka FGU 40 o výkonu 11 kW od českého výrobce TOS Olomouc, která se vyznačuje velkou robustností a tuhostí konstrukce. Stroj je dovybaven přívodem inertního plynu a digitálním odměřovacím zařízením umožňující komfortnější nastavování geometrické polohy FSW nástroje vůči svařenci. Žádné další úpravy na stroji nebyly prováděny. Druhým strojem je 3-osá numericky řízená ložová frézka FSG 80/A2 od českého výrobce TOS Kuřim. U tohoto stroje byly prováděny úpravy spočívající ve zvýšení únosnosti u pohonu osy "z" tak, že maximální možné zatížení vzrostlo z původních 15 kN na 22 kN. Uvedená zařízení nedisponují automatickým systémem řízení relativní polohy svařovacího nástroje vůči svařované součásti. Polohu je zde možné řídit v rámci CNC programu nebo ručně, jako reakci na data získaná z pasivního monitorovacího systému LOWSTIR[®] nebo pozorováním procesu obsluhou stroje. Oba stroje jsou

používány pro výzkumné aktivity, spojené s metodou 43, frikční svařování v rámci malosériové výroby a primárně pro klasické obrábění.

2.4.3 Parametry svařování

Nejvlivnějším parametrem svařovacího procesu je geometrie a provedení aktivních částí nástroje. Některé další parametry se volí s ohledem na konstrukci nástroje.

Další důležité svařovací parametry:

- Rychlost otáček vřetene
- Rychlost pohybu nástroje
- Hloubka zanoření nástroje do základního materiálu
- Úhel náklonu nástroje vůči čelu základního materiálu

2.4.4 Výhody a nevýhody třecího svařování s promíšením

Výhody ^[34]

- Minimální deformace svařence i u dlouhých svarů
- Vysoká kvalita svarového kovu, bez porézности, nečistot a smršťení
- Vysoká trvanlivost nástroje (u Al slitin okolo 1 km)
- Svařování ve všech polohách
- Vysoká energetická účinnost
- Al slitiny svařujeme bez ochranné atmosféry
- Při svařování nevznikají nebezpečné výpary a dým

Nevýhody ^[34]

- Svařovací rychlost je menší ve srovnání s některými tavnými metodami
- Nutno mít na každý materiál a typ spoje jiný nástroj

- Svařovaná součást musí být velmi pevně upnuta
- Otvor na konci každého svaru

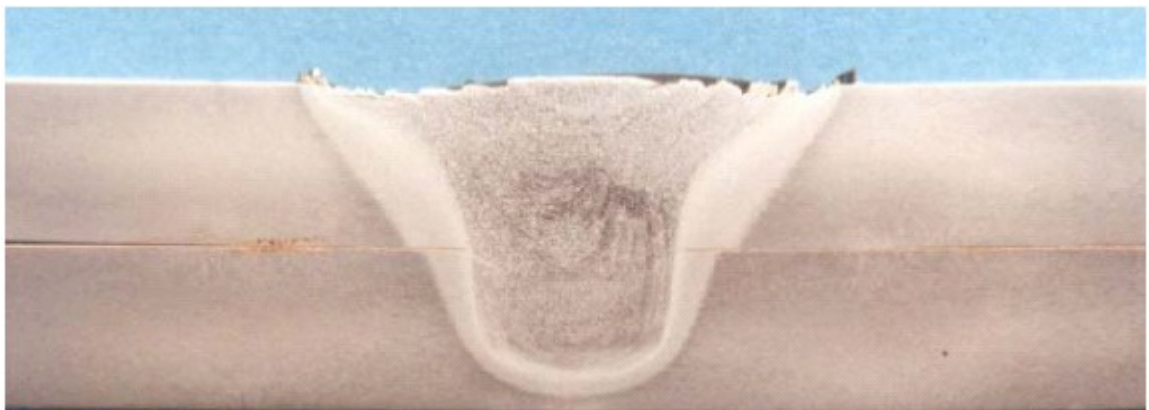
2.4.5 Aplikace třecího svařování s promíšením

Svařitelnost je zaručena u:

- Al slitiny třídy 2000 (Al-Cu)
- Al slitiny třídy 5000 (Al-Mg)
- Al slitiny třídy 6000 (Al-Mg-Si)
- Al slitiny třídy 7000 (Al-Zn)
- Al slitiny třídy 8000 (Al-Li)

Dále je úspěšně svařována:

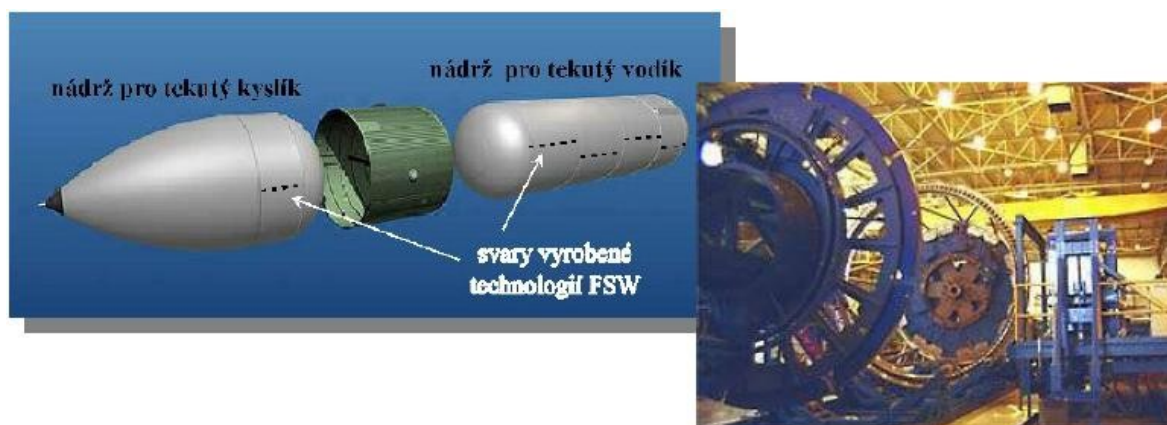
- Měď a její slitiny
- Olovo
- Titan a jeho slitiny
- Kompozitní materiály s kovovou matricí (především s Al matricí)
- Ostatní typy Al slitin třídy 1000, 3000 (Al-Mn), 4000 (Al-Si)
- Plasty (PS, ABS, PMMA, PC, POO/PA, PA)
- Hořčíkové slitiny
- Zinek
- Měkká ocel



Obr. 2.4.6 Makrostruktura 25 mm přeplátovaného spoje z oceli X2CrNi12 ^[37]

Palivové nádrže raket pro kosmický program

Od konce 90. let začala společnost Boeing, z důvodu stále se zvyšujícího množství obtížně svařitelných hliníkových slitin v oblasti kosmických aplikací, využívat metodu 43 při výrobě nádrží raket Delta II, III a IV. První raketový nosič vyrobená touto metodou byl úspěšně vypuštěn v roce 1999. Aplikací této metody se při výrobě nádrže rakety Delta IV zvýšila pevnost svarových spojů o více jak 35%, výrobní náklady se snížily o 60% a byla zkrácená výrobní doba z 23 na 6 dnů. Na základě dobrých zkušeností s metodou bylo rozhodnuto o její aplikaci na nádrže Space Shuttle External Tank.



Obr. 2.4.7 Space Shuttle External Tank a jeho výrobní zařízení pro svařování ^[34]

Advanced Amphibious Assault Vehicle

Tyto obojživelné útočné vozidla, vyvíjené pro U.S. Navy Corps, by měly být dodány v roce 2015 v počtu 573 kusů. Vozidlo se skládá z rámu ze speciální hliníkové slitiny 2519-T87, na kterém je dále připevněn pancíř z kompozitních a keramických materiálů. Tato slitina byla vyvinuta pro použití na pancíře obrněných vozidel. Některé svarové spoje tohoto rámu, svařovaného metodami 131 a 135, nebyly schopné splnit požadované balistické vlastnosti, což se připisovalo snížení tažnosti v místě svarového spoje. Z tohoto důvodu byly učiněny zkoušky svařování této slitiny metodou 43, jejichž výsledkem měl být svar se stejnými mechanickými vlastnostmi a zvýšenou tažností, jako u svarů vyrobených stávajícími metodami. Po optimalizaci svařovacích parametrů svar dosáhl stejných mechanických vlastností a tažnost byla výrazně zvýšena, svarový spoj obstál i při balistických testech. Na základě těchto výsledků byla vytvořena technologie svařování rámu i s použitím metody 43, kde u některých svarů byla zvýšena produktivita až o 400%. Touto metodou byly nahrazeny, z důvodu snížení deformace rámu, i jiné svary rámu. ^[38]

Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	V	Zn	Zr
5,6	0,15	0,19	0,28	0,007	0,06	0,06	0,05	0,07	0,19

Tab. 2.4.2 Chemické složení hliníkové slitiny 2519-T87 v procentech ^[39]

Eclipse 500

Jedná se o luxusní šestimístný proudový letoun, vyznačující se hlavně nízkými pořizovacími náklady, které dosahujícími až na čtvrtinu ceny v porovnání s běžnými malými proudovými letadly, přitom by mělo být letadlo značně bezpečnější, levnější a ovladatelnější z hlediska provozu. Těchto výsledků bylo také dosaženo masivním použitím nejmodernější metody přípravy, dělení, obrábění a spojování materiálů. Drak letounu se skládá z několika velkých panelů svařených metodou 43 a monolitních dílů, které jsou k sobě spojené pomocí speciálních nýtů. Pomocí metody 43 se podařilo zredukovat počet, u letadel běžných, nýťovaných spojů až o 60%. Nýtování bylo zachováno hlavně v oblasti ocasních ploch, kde z důvodu složitých a uzavřených tvarů ploch nebylo možno metodu 43 ekonomicky efektivně použít. Letounů bylo, až do přerušení výroby, vyrobeno 260 ks čímž se jedná o jednu z nejvýznamnějších aplikací této metody v rámci komerčního použití. ^[34]

2.5 Laser-hybridní svařování

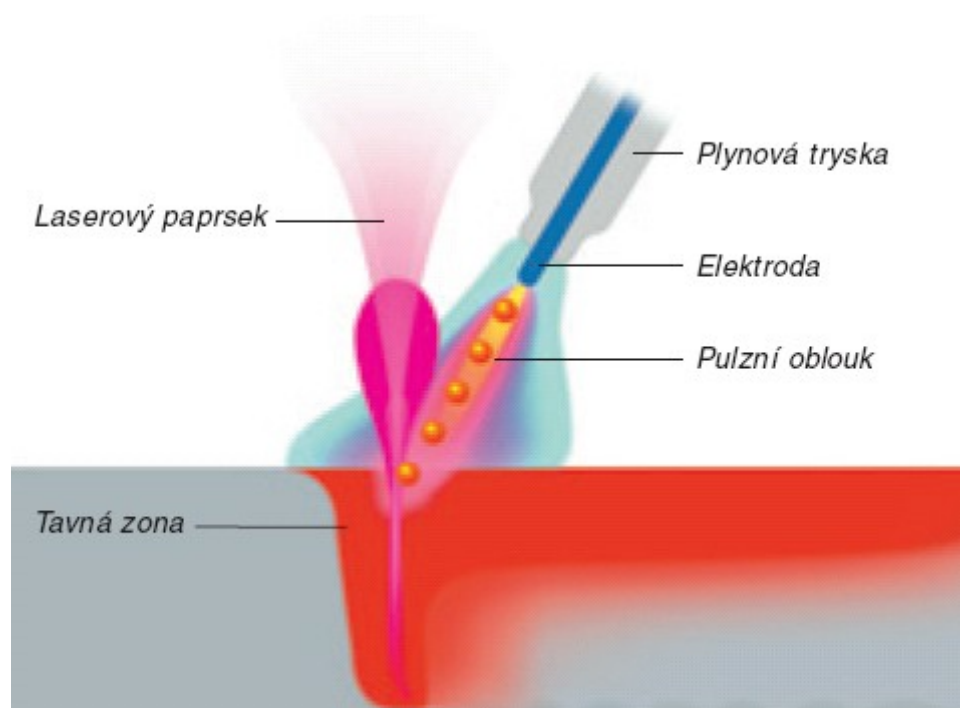
Jedná se o mladou metodu svařování, významněji aplikovanou do konce 90. let, spojující laserové svařování s obloukovým svařováním. Z laserového svařování přejímá výhody hlavně hlubokého závaru a vyšší svařovací rychlost, než u metody obloukového svařování, a z obloukového svařování přejímá možnost překlenutelnosti větší svarové mezery a přívod přídavného materiálu do svarového kovu. Metoda se nejčastěji využívá v kombinaci s průmyslovými roboty. Mezi metody laser-hybridního svařování patří spojení metod laserového svařování s metodou: ^{[20] [40]}

- Obloukového svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu (131)
- Obloukového svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu (135)
- Obloukového svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (141)

- Plazmového svařování (15)

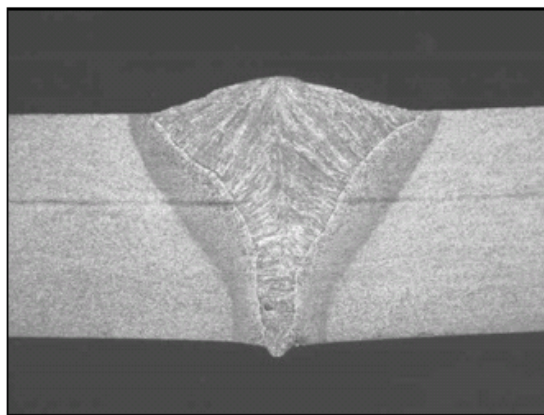
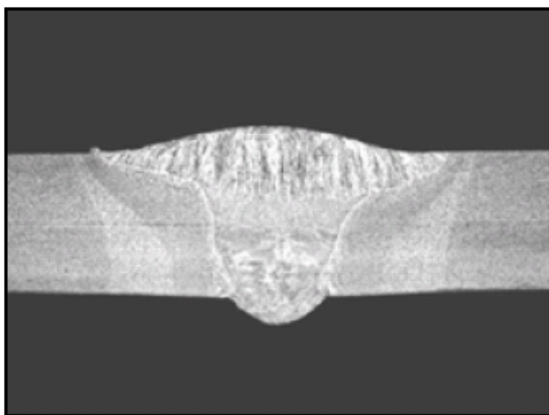
2.5.1 Princip metody

Nejpoužívanější kombinace laser-hybridního svařování je pevnolátkový laser Nd: YAG v kombinaci s metodou 131 a 135. Hlavním zdrojem tepla u tohoto svařování je laserový paprsek, který nám natavuje základní materiál a vytváří v něm „klíčovou díрку“. Přídavný materiál je do svaru přiváděn pulzním obloukem metody 131 nebo 135. Přídavný materiál je přiváděn před nebo za dopadající laserový paprsek. Jednotlivé uspořádání se projeví na tvaru svarové lázně a tepelně ovlivněné oblasti. Svarová lázeň je zde chráněna aktivním nebo inertním plynem, který je aplikován z hořáku obloukového svařování. (Obr. 2.5.1) Celé toto zařízení je integrováno do svařovací hlavy, která se montuje na robotizovaný manipulátor.

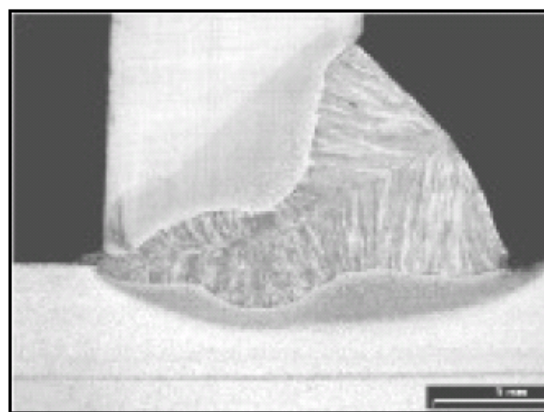
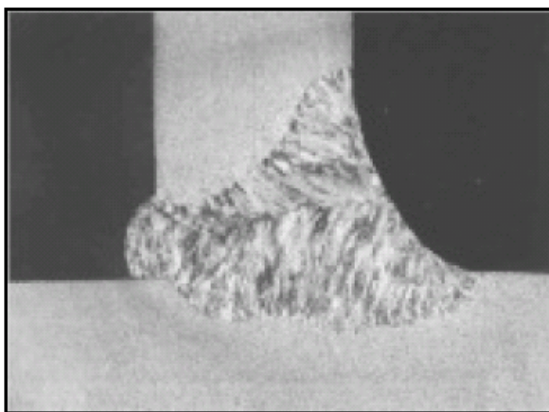


Obr. 2.5.1 Princip laser-hybridního svařování ^[41]

Svařováním laser-hybridem je možné vytvářet tupé svary, T-spoje i překlátované svary. Tupé a koutové svary mají v porovnání s metodami 131 a 135 užší průřez svaru a tepelně ovlivněnou oblast. (Obr. 2.5.2, Obr. 2.5.3)



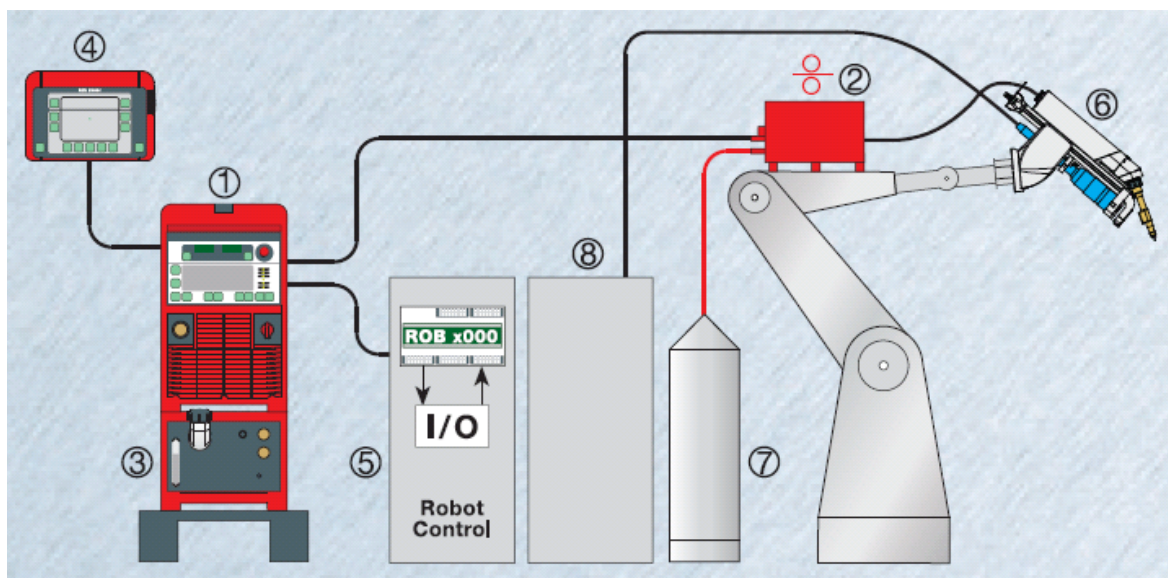
Obr. 2.5.2 Porovnání makrostruktury svaru metodou 135 (vlevo) za svařovacího času 0,12 m/min a laser-hybridu (vpravo) za svařovacího času 0,8 m/min ^[42]



Obr. 2.5.3 Porovnání makrostruktury svaru T-spoje metodou 131 (vlevo) za svařovacího času 0,24 m/min a LaserHybrid (vpravo) za svařovacího času 1,0 m/min ^[42]

2.5.2 Svařovací zařízení

Laser-hybridní svařovací zařízení se skládá z procesorem řízeného svařovacího zdroje s podavačem drátu a zdroje laserového záření. Současné působení obou zařízení kontroluje řídicí jednotka. Obě součásti vyústějí do svařovací hlavy, která je namontovaná na robotnickém rameni. (Obr. 2.5.4) Laserový paprsek musí být přenositelný optickým kabelem, proto se k laser-hybridnímu svařování používají pevnolátkové lasery, v dnešní době se používají Nd: YAG lasery.



Obr. 2.5.4 Zařízení pro laser-hybridní svařování 1 – Svařovací zdroj, 2 – Podavač drátu, 3 – Chladicí modul, 4 – Dálkový ovládací panel, 5 – Řídicí jednotka robotu, 6 – Svařovací hlava, 7 – Zásobník drátu, 8 – Zdroj laserového záření ^[41]

Svařovací hlava

Jádrem celého svařovacího systému je kompaktní svařovací hlava, která v sobě integruje svařovací hořák pro metodu 131 a 135 a laserovou optiku. Oba prvky slouží k tvorbě elektrického oblouku, zaostřeného laserového paprsku, přívodu přidavného materiálu a ochranného plynu. (Obr. 2.5.5) Navíc musí splňovat poměrně přesnou geometrii nastavení elektrody vůči laserovému paprsku, při dopadu na svařovaný materiál. Vhodnou geometrií snižujeme vnesené teplo do svaru. Geometrii můžeme měnit v závislosti na typu přípravy svaru, výkonu, druhu a složení elektrody a účelu spoje.



Obr. 2.5.5 Svařovací hlava laser-hybridního svařování ^[43]

Pro zvýšení výkonu laser-hybridního svařování je vyvinuta svařovací hlava laser-hybrid + tandem, která je prakticky totožná s předchozí hlavou, navíc však obsahuje hořák pro tandemové svařování metodou 131 nebo 135. (*Obr. 2.5.6*) Při svařování je zde dodáván přídavný materiál ze tří elektrod.



Obr. 2.5.6 Svařovací hlava laser-hybrid + tandem svařování ^[43]

2.5.3 Parametry svařování

Parametry svařování u této metody by měly být kombinací metod 131 a 521.

Parametry svařování pro metodu 521 jsou popsány v kapitole 2.4.3. Zbývající svařovací parametry, které se vztahují na metody 131, jsou předepsané normou ČSN EN ISO 15609-1:

- Druh proudu (stejnoseměrný nebo střídavý proud) a polarita
- Podrobnosti pulzního svařování (nastavení stroje, výběr programu)
- Proudový rozsah
- Rozsah pojezdové rychlosti
- Rozsah rychlosti podávání drátu/pásky
- Použitý ochranný plyn – označení a složení podle EN 439
- Rozsah tepelného příkonu, pokud je specifikován
- Průtokové množství ochranného plynu a průměr plynové hubice
- Počet drátových elektrod
- Doplnkový přídavný materiál
- Vzdálenost napájecí špičky/napájecího průvlaku od povrchu pracovního kusu
- Rozsah napětí na oblouku

Dále má na svařování vliv geometrie nastavení polohy dopadu laserového paprsku s polohou tavící se elektrody.

2.5.4 Výhody a nevýhody laser-hybridního svařování

Zde vyjmenované výhody jsou vztaženy k laser-hybridnímu svařování v kombinaci Nb: YAG laser s metodou 131 a 135. Porovnání je zde mezi uvedeným laser-hybridním svařování a metoda 131 a 135.

Výhody ^[40]

- Snížení ceny svarového spoje, zvýšenou svařovací rychlostí a sníženou spotřebou přídavného materiálu a ochranného plynu
- Svarový spoj s lepšími mechanickými vlastnostmi a povrchovou kresbou
- Téměř bezrozstřikové svařování
- Zmenšení tepelné deformace svarku a tepelně ovlivněné oblasti
- Možnost výroby všech typů svarů, včetně svaru přeplátovaného
- Zvýšení hloubky závaru, výhodné hlavně u koutových svarů
- Dokonalejší překlenutí svarových mezer

Nevýhody ^[40]

- Vysoké investiční náklady spojené s nákupem a instalací zařízení, předurčující metodu pouze pro sériovou výrobu
- Nízká mobilita a flexibilita robotizovaného zařízení

2.5.5 Aplikace laser-hybridního svařování

Tato metoda svařování se nejčastěji používá ve strojírenském průmyslu, hlavně se zde jedná o dopravní techniku, elektrotechnické výrobě, výrobě zdravotnických zařízení. Ekonomicky nejsilnější stránkou této metody jsou dlouhé spoje, kde jsme schopni dosáhnout i šestinásobku svařovací rychlosti a spotřebu osmnáctiny množství ochranného plynu v porovnání s metodou 131 a 135. Cena délky svaru při započtení i dalších pozitivních vlastností laser-hybridního svařování může dosáhnout až 44% úspory, v porovnání s metodou 131 a 135.

Jelikož je metoda relativně nová, nejsou známy všechny materiály, které jí jsou svařitelné. Úspěšně však byla aplikována při svařování ocelí, hlavně vysokolegovaných a povlakovaných nelegovaných ocelí a hliníkových slitin.

Svařování karosérie vozu Audi A8

Laser-hybridní svařování se u tohoto vozu používá k napojování ocelových i hliníkových

plechových dílů na lisovaný profil karosérie. Celkem bylo na jednom vozidle provedeno 65 svarů s celkovou délkou spáry cca 5 m. Délka jednotlivých svarů se pohybovala od 30 do 260 mm. Aplikací laser-hybridního svařování se zde zvýšila produktivita výroby karosérie i kvalita svarového spoje a snížila se tepelná deformace karosérie.

Svařování dveří vozu Volkswagen Phaeton

Svařování se zde provádí pro spojení lisovaných profilů, odlitků a plechů z hliníku. Pro svařování jsou zde použity metody 131, 52 a laser-hybridní svařování. Na jedny dveře je zde použito sedm svarů metodou 131 o celkové délce svaru 380 mm, jedenáct metodou 52 o celkové délce 1030 mm a 48 laser-hybridním svařováním o celkové délce 3570 mm. ^[44]

Svařování panelů lodních trupů

Při svařování lodních konstrukcí je nutno svařit mnoho kilometrů svarů o vysoké kvalitě a z relativně tlustých materiálů. V loděnici J. L. Meyer GmbH v Německu bylo použito pro svařování plechů tl. 15 mm laser-hybridní svařování na panely sekce lodních trupů a bočních stěn o rozměrech až 20 x 20 m. Při stávající metodě 135, vlivem široké tepelně ovlivněné oblasti a velkému průřezu housenky, docházelo k výrazným deformacím a smršťování panelů, kvůli čemuž bylo po svařování nutno panely rovnat a vyvažovat velké mezery svarových úkosů. Od roku 1999 byla zavedena v loděnici automatická svařovací laser-hybridní linka pro svařování tupých i koutových svarů palubních panelů a bočních stěn (*Obr. 2.5.7*), což značně redukovalo tepelné zatížení a pokles svarového spoje je lokalizován pouze na úzký pás kolem svaru. ^[45]



Obr. 2.5.7 Laser-hybridní svařovací linka pro koutové a tupé svary panelů lodních trupů v loděnicích J. L. Meyer GmbH ^[45]

3. Přehled společností aplikujících moderní metody svařování v ČR

Jednotlivé společnosti komerčně aplikující výše popisované metody jsou zařazeny do tabulek podle metody svařování, kterou aplikují. Ostatní informace, které jsou uvedeny u společnosti, se týkají praktického použití metody v dané společnosti.

Společnost	Okruh působnosti	Sortiment	Materiály	Poznámky
Český svářečský ústav s.r.o.	Energetika	Omezovače tlaku pro potrubní systémy	Korozivzdorné oceli, Inconel	Mikroplazmové svařování
DI industrial spol. s r.o.	Vakuová technika, Laboratorní zařízení	Vakuové fitinky, membrány, průchodky, trubky	Korozivzdorné oceli, magneticky měkké materiály (Permalloy, Behanit)	Mikroplazmové svařování
PEVEKO spol. s r.o.	Energetika, Elektrotechnika, Automobilový průmysl, aj.	Elektromagnetické ventily, regulační technika		Nevyjádřila se, Mikroplazmové svařování
První železářská společnost Kladno, s. r. o.				Nevyjádřila se
TENEZ a.s.				Nevyjádřila se

Tab. 3.1 Seznam společností aplikujících plazmové svařování

Společnost	Okruh působnosti	Sortiment	Materiály	Poznámky
Arako spol. s r.o.	Energetiky, chemický a petrochemický průmysl	Průmyslové armatury		Nevyjádřila se
DI industrial spol. s r.o.	Vakuová technika, laboratorní zařízení	Vakuové fitinky, membrány, průchodky, trubky	Korozivzdorné oceli, magneticky měkké materiály (Permalloy, Behanit)	
Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.	Letecká technika	Plechové díly pro proudové motory		Nevyjádřila se

Tab. 3.2 Seznam společností aplikujících elektronové svařování

Společnost	Okruh působnosti	Sortiment	Materiály	Poznámky
Brose CZ spol. s r.o.	Automobilový průmysl			Nevyjádril se
LCV Praha, s.r.o.	Automobilový, Letecký, Srojírenský a Zbrojní průmysl, Zdravotnictví, aj.	Součásti kompresorů, Stenty, Hlavně pušek, Opravy forem	Nástrojové, Korozivzdorné oceli, Al slitiny, Nitinol, Amco	
LINTECH, spol. s r.o.	Opravy a úpravy nástrojů			Nevyjádril se
MATEX PM, s.r.o.	Energetický, Chemický a Srojírenský průmysl, Architektura	Speciální profily, Nadrozměrné plechy, Díly motoru, Těsnící dveře, aj.	Vysokopevné, Jemnozrnné, Konstrukční a Nástrojové oceli, Al slitiny	Výroba v rámci "job-shopu"
VATRANS Zlín, v.o.s.	Výroba polotovarů	Podélně svařované trubky a profily	Korozivzdorné, legované a nelegované oceli	Nevyjádril se
ZNZ DENT, s.r.o.	Zubní protetika, Oční optika	Zubní protézy, Brýle	Cr-Co, Cr-Ni, Titan, Ocel	Laserové mikrosvařování

Tab. 3.3 Seznam společností aplikujících laserové svařování

Společnost	Okruh působnosti	Sortiment	Materiály	Poznámky
VZLÚ, a.s.	Letectví, kosmonautika, dopravní strojírenství, aj.	deskové výměníky tepla, vyztužené panely z lehkých slitin, atypické profily z Al slitin	slitiny Al, Cu a Mg, vysokopevnostní ocel USIBOR 1500	Převážně výzkumná činnost, nabídka komerčního svařování
---	Energetika	profily z Al slitin	Al slitiny	

Tab. 3.4 Seznam společností aplikujících třecí svařování s promíšením

4. Diskuze výsledků

Přehled společností aplikujících moderní metody svařování v ČR, který je zde uveden, není v žádném případě kompletní. K této skutečnosti došlo z několika důvodů:

- Firemní know-how – některé společnosti záměrně používání těchto metod svařování neuveřejňují. Rovněž dodavatelé svařovacích zařízení neuvádějí, kterým společností svařovací zařízení dodali, aby nepoškodili jejich know-how.

- Neodpovězení na dotazník – z důvodu časového vytížení pracovníků společností a jiných důvodů tak mnohé společnosti učinily. Dotazovaných potenciálně aplikujících společností bylo 47, z nich jich odpovědělo pouze 14. Dotazovaných dodavatelů zařízení bylo 16, z nich jich odpovědělo 5.
- Nedostatečná příprava – příprava na odeslání dotazníků a sběr informací o společnostech trvala přibližně 14 dní, což se ukázalo jako nedostatečné.

Lze předpokládat, že plazmových svařovacích zařízení je v ČR mnohem více, než je uvedeno v přehledu společností. Bohužel se jich podařilo vypátrat jen malé množství. K tomuto tvrzení přispívá vyjádření firmy FRONIUS Česká republika s.r.o., která těchto zařízení prodala přes 15. Navíc prodejců zařízení na plazmové svařovacích je v ČR větší množství.

Elektronové svařování je v ČR aplikováno ve více společnostech, než je uvedeno v seznamu. Bohužel některé společnosti nejsou ochotny přiznat, že tuto metodu provozují. Takovým příkladem jsou společnosti působící v oblasti automobilního průmyslu, které vlastní min. 1 svařovací zařízení. Počet svařovacích zařízení však nebude o mnoho vyšší, než je uvedeno v seznamu.

K provozování laserového svařování se v ČR přihlásilo několik společností z různých oblastí působení. Je však třeba počítat s mnohem větším využitím v rámci ČR. Tuto skutečnost potvrzuje i tvrzení dodavatele zařízení, společnosti TRUMPF Praha, s.r.o., o dodání více než 50 svařovacích zařízení o výkonu od 50 W do 10 kW. Navíc tato společnost není jediným dodavatelem svařovacího zařízení v ČR.

Frikční svařování s promíšením je již v ČR aplikováno. Společnost VZLÚ, a.s. touto metodou svařuje již několik let, jedná se spíše o součásti pro vnitřní využití společnosti a výzkumné účely, nabízí ale i svařování pro komerční účely. Nejmenovaná společnost, působící v oblasti energetiky, již přes rok tuto metodou zkouší aplikovat na své výrobky pod vedením VZLÚ, a.s. Podle vyjádření, jednoho z nejdůležitějších dodavatelů komerčně vyráběných zařízení, ESAB VAMBERK, s.r.o., nebylo do ČR stále žádné takové svařovací zařízení dodáno. Společnost Hydro Aluminium Prague s.r.o., která nabízí spojování materiálů touto metodou, si je nechává vyrábět v závodě Hydro Aluminium Profiler a.s v Karmøy (Norsko).

Používání Laser-Hybridního svařování v ČR nebylo prokázáno. Dodavatele zařízení pro tuto metodu firmy CLOOS PRAHA, spol. s r.o. a FRONIUS Česká republika s.r.o. toto tvrzení potvrdily. Firma CLOOS PRAHA, spol. s r.o. však v současné době vypracovává projekt pro nejmenovanou společnost, která by touto metodou pak mohla svařovat části nástaveb pro nákladní automobily.

V ČR dále existuje několik svařovacích zařízení, které jsou však používány pro výzkumné účely. Například Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. disponuje svařovacím zařízením pro laserové a elektronové svařování. Takové společnosti nebyly do seznamu záměrně uváděny.

5. Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o používání plazmového, elektronového, laserového, laser-hybridního svařování a třetího svařování s promísením na území ČR. Bylo zjištěno, že kromě laser-hybridního svařování, jsou všechny tyto metody svařování na území ČR již používány.

Přehled metod svařování byl vypracována s použitím nejnovějších zdrojů informací z odborné literatury, tudíž by práce měla nastiňovat aktuální stav a vývoj u těchto metod svařování. Tento přehled pojednává o principech fungování metody, svařovacím zařízením, parametrech svařování, výhodách a nevýhodách a příkladech praktických aplikací dané metody. U plazmového, elektronového a laserového svařování jsou svařovací parametry doslovnou citací z příslušných norem, které slouží ke specifikaci postupu svařování. Zbývající dvě metody svařování stále nemají normou předepsané svařovací parametry, tudíž zde byly uvedeny parametry získané z odborné literatury.

Přehled společností, které aplikují tyto metody na území ČR není zcela kompletní. Lze z něj ale vyčíst na jak druhy výrobků a materiálů se tyto metody svařování dají použít. Podle tohoto přehledu je možné si tyto společnosti vyhledat a kontaktovat je, pokud by bylo potřeba si nechat vyrobit nějaké strojní součásti těmito specifickými metodami svařování.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Drahomíru Schwarzovi, CSc. za vstřícný přístup, cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. a Ing. Petru Bělskému za cenné informace týkající se laserového svařování a třecího svařování s promíšením. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat dalším osobám, díky kterým jsem získal další cenné informace, a společností, které mi odpověděly na zasláný dotazník.

Seznam použité literatury

- [1] Moderní metody svařování. *Technický týdeník*. 29. 6. 2010, č. 13, s. 31.
- [2] AMBROŽ, Oldřich; KANDUS, Bohumil; KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava : Zeross, 2001. Zvláštní způsoby svařování, s. 395. ISBN 80-85771-81-0.
- [3] SAPP, Mark E. *A History of Welding* [online]. 1987, 18.12. 2009 [cit. 2010-12-23]. Welding Timeline. Dostupné z WWW: <<http://weldinghistory.org/whistoryfolder/welding/index.html>>.
- [4] ROUBÍČEK, M. *Laserové svařování- 1. díl*. In MM Průmyslové spektrum, 2006. č. 2, s. 68 – 72. ISSN 1212-2572.
- [5] TURŇA, Milan. *Speciálně metody zvárania*. Bratislava : ALFA, 1989. 384 s. ISBN 80-05-00097-9.
- [6] KOU, Sindo. *Welding Metallurgy*. Second Edition. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2003. 455 s. ISBN 0-471-43491-4.
- [7] Antonín Šafář - SATOP [online]. 2011 [cit. 2011-05-08]. Svařovací technika SBI - plazmové svařování. Dostupné z WWW: <<http://www.as-satop.cz/index.php?nid=5850&lid=CZ&oid=927340>>.
- [8] Svět digitálního plazmového svařování. *Weld+Vision* [online]. Duben 2007, č. 18, [cit. 2011-05-08]. Dostupný z WWW: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-9B3A2365-A763CDAD/fronius_international/40_0006_2801_0107_CS_44783_snapshot.pdf>.
- [9] SCHLIXBIER , Michal. *Časopis Konstrukce* [online]. 7.9.2005, 25.12.2008 [cit. 2011-05-08]. Trendy vývoje svařování plazmou. Dostupné z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/trendy-vyvoje-svarovani-plazmou/>>.
- [10] NOGOL, Petr. *Plazmové svařování výfuku motorů*. Brno, 2010. 41 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

[11] *Welding.cz* [online]. 10.5.2007 [cit. 2011-05-08]. Svařování neželezných kovů. Dostupné z WWW: <http://www.welding.cz/vyvoj/svar_00/00_1-5.htm>.

[12] *EWM Hightec Welding : EWM Group Czech* [online]. 2009 [cit. 2011-05-08]. Microplasma - s nejvyššími nároky v technice svařování drobných dílů. Dostupné z WWW: <<http://www.ewm-group.cz/microplasma/>>.

[13] *Encyklopedie CoJeCo* [online]. 14.3.2000, 18.1.2007 [cit. 2011-02-18]. Svařování elektronovým paprskem. Dostupné z WWW: <http://www.cojeco.cz/index.php?id_desc=92804&s_lang=2&detail=1&title=sva%F8ov%E1n%ED%20elektronov%FDm%20paprskem>.

[14] *Laser Welding* [online]. [cit. 2011-05-08]. Electron Beam Welding. Dostupné z WWW: <<http://physicsnobelprize.net/ebw.html>>.

[15] PAZDERA, Aleš. *Návrh na snížení deformací při svařování dílce leteckého motoru*. Ostrava, 2010. 42 s. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie.

[16] DOBENECK, Dietrich. *Electron beam welding : Examples of 30 Years Job-Shop Experience*. Germany : Pro-beam AG & Co. KGaA, 2005. 72 s.

[17] SCHUBERT, G. *In Proceedings of the IIW International Conference on Advances in Welding and Allied Technologies*. Singapore : Singapore Welding Society, 2009. Electron Beam Welding – Process, Applications and Equipment, s. 283 – 288. ISBN 978-981-08-3259-9.

[18] VOGELI, C., et al. Aplikace automatického svařování elektronovým paprskem při výrobě dopravních prostředků. In *Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování : 12. ročník odborného semináře*. Ostrava : Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, 2009. s. 191-199. ISBN 978-80-248-2066-8.

[19] VRÁBLÍK, Filip. Nové možnosti efektivního využití technologie svařování elektronovým paprskem v sériové výrobě rozměrných součástí. In *Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování : 13. ročník odborného semináře*. 1. vyd. Ostrava : Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, 2010. s. 37-44. ISBN 978-80-248-2304-1.

- [20] HLA VATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování* [online]. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2011 [cit. 2011-05-09]. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/indexs.htm>>. ISBN 978-80-248-2414-7.
- [21] KOŘÁN, Pavel. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 7. října 2009 [cit. 2011-05-09]. Poslední trendy ve svařování laserem. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/posledni-trendy-ve-svarovani-laserem>>.
- [22] SZTEFEK, Radek. *Teorie svařování laserem*. Ostrava, 2011. 56 s. Semestrální práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie.
- [23] BECK, M.; BERGER, P.; HUGEL, H. The effect of plasma formativ on beam focusing in deep penetration welding with CO2 lasers. *Journal of Physics D : Applied Physics*. 1995, vol. 28, no. 12, s. 35-47.
- [24] BLEHER, Jens. Každá laserová technologie má svůj potenciál. *MM Průmyslové spektrum*. 8. 10. 2008, 2008, č. 10, s. 28-29.
- [25] *Process Monitoring System Welding Monitor PD 2000* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2006 [cit. 2011-05-16]. Dostupné z WWW: <http://www.prometec.com/download/datasheets_laser/PD2000_GB.pdf>.
- [26] MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky*. Brno, 2009. 19 s. Výuková prezentace. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [27] HAVRILLA, David; BROCKMANN, Rüdiger. Třetí generace diskových laserů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 18. 11. 2009 , č. 11, [cit. 2011-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/treti-generace-diskovych-laseru>>.
- [28] KUBÍČEK, J.; HYKEL, J.; MRŇA, L. Svařování laserem v podmínkách současné technické praxe. In *Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování : 11. ročník odborného semináře*. Ostrava : Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, 2008. s. 75-85. ISBN 978-80-248-1825-2.
- [29] HŘIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Bratislava : Vydavateľstvo slovenskej akademie vied, 1989. 344 s. ISBN 80-224-0016-5.
- [30] ŘASA, Jaroslav ; JINDROVÁ, Radka . Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 17. 7. 2006, č. 7, [cit. 2011-05-16]. Dostupný

z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>>.

[31] ZATLOUKAL, Petr. *Welding.cz* [online]. 10. 5. 2007 , 3. 4. 2011 [cit. 2011-05-16]. Laserové svařování. Dostupné z WWW: <<http://www.welding.cz/laser/svarovani.htm>>.

[32] TURŇA, Milan; KOVAČÓCY, Pavel. *Zváranie laserovým lúčom*. Bratislava : STU v Bratislave, 2003. 90 s. ISBN 80-227-1921-8.

[33] ČERNÝ, Václav . Laser - od objevu k průmyslovým aplikacím . *Elektro* [online]. 2005, č. 4, [cit. 2011-05-16]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26271>.

[34] BĚLSKÝ, Petr. *First Eurostir Workshop : FSW - making it work for you*. Praha : VZLÚ, a.s., 2002. 57 s.

[35] RAI, R., et al. Review : Friction Stir Welding Tools. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. May 2011, vol. 16, no. 4, [cit. 2011-05-16]. Dostupný z WWW: <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2011/tools_Rai_STWJ_2011.pdf>. ISSN 1362-1718.

[36] *Hitachi Automotive Systems America, Inc. : Los Angeles Office* [online]. 2004, 22.01.2008 [cit. 2011-05-06]. Hitachi FSW Equipment. Dostupné z WWW: <<http://www.hitachi-automotive-la.us/DM/eqp.htm>>.

[37] THEADGILL, P. L.; JOHNSON, R. *Progress in Friction Stir Welding of Steels*. Cambridge : The Welding Institute, 2004. 32 s.

[38] *Frontier* [online]. 2002 [cit. 2011-05-06]. Friction Stir Welding of Aluminum Armor for the AAIV. Dostupné z WWW: <<http://mysite.ncnetwork.net/web22rsi/AAIV%20copy.pdf>>.

[39] DEVLETIAN, Jack H.; DEVINCENT, Sandra M.; GEDEON, Steven A. *Weldability of 2519-T87 Aluminum Alloy*. Watertown : U.S. Army Materials Technology Laboratory, 1988. 20 s.

[40] TEPLÝ, Jan. *Analýza svařování LaserHybridem*. Brno, 2010. 44 s. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

[41] *Vysokovýkonové svařování : LaserHybrid, TimeTwin Digital, plochý drát, dráty velkých průměrů*. Wels : Fronius International GmbH, 2008. 16 s.

[42] *MSG-Laser-Hybrid Welding Process* [online]. 2009 [cit. 2010-03-20]. CLOOS schweisstechnik. Dostupné z WWW: <<http://www.cloos.com.cn>>.

[43] *FRONIUS Česká republika s.r.o.* [online]. 2006 [cit. 2011-05-16]. Laser. Dostupné z WWW: <http://www.fronius.cz/cps/rde/xchg/SID-326A139F-905BAFCF/fronius_ceska_republika/hs.xml/29_628.htm>.

[44] STAUFER, H.; RÜHRNÖBL, M.; MIESSBACHER, G. *LaserHybrid Welding and LaserBrazing : State of the Art in Technology and Practice by the Examples of the Audi A8 and VW-Phaeton* [online]. Wels : Fronius International GmbH, 21.1.2004 [cit. 2011-05-16]. Dostupné z WWW: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/fronius_international/12_laserhybrid_laserloeten_gb.pdf>.

[45] KUBÍČEK, Jaroslav ; MRŇA, Libor . *Technické aspekty svařování laserem* [online]. Brno : Svarák.cz, 14.3.2008 [cit. 2011-05-16]. Dostupné z WWW: <http://www.svarak.cz/f/svarak/p/PDF%20%C4%8DI%C3%A1nky/PDF_%C4%8Cesky/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20laserem.pdf>.